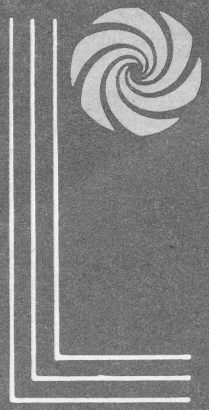
SINTEZE LYCEUM

GHEORGHE HUȚANU

# PRINCIPII ȘI LEGI FUNDAMENTALE ÎN FIZICĂ

EDITURA ALBATROS



În lucrarea de față, Gheorghe Huțanu, doctor în fizică, prezintă într-o manieră accesibilă și modernă cea mai mare parte a principiilor și legilor fizicii. Descrierea aplicațiilor și extinderile lor în practică completează spectaculos descoperirile fizicii secolului nostru.

De remarcat, în cuprinsul lucrării, microbiografiile unor fizicieni celebri, cît și suita de întrebări și răspunsuri amuzante adresate celor care doresc să-și verifice plăcut cunoștințele de fizică.

Lei 13,50

# *DIN PARTEA AUTORULUI*

*Qui genus humanum ingenio superavit*[1]

*În epoca în care trăim, în domeniul științei și tehnicii se înregistrează continuu uimitoare progrese. Multe dintre aceste progrese depășesc, prin realizarea lor practică, cutezătoare preziceri izvorîte din imaginația creatoare a oamenilor. La baza multora dintre ele stau principiile și legile fundamentale ale fizicii și, de aceea, se impune o cunoaștere cît mai bună a lor. Aceste considerente au constituit un îndemn pentru scrierea cărții de față.*

*Multe din principiile și legile fundamentale din fizică sînt legate de numele unor savanți, oameni care au contribuit la dezvoltarea fizicii și care sînt exemple vii de pasiune și de competență științifică, de muncă plină de renunțări, generoasă, pusă în slujba progresului social, în slujba omenirii.*

*Lucrarea prezentă nu este un manual, ci își propune să contribuie la completarea cunoștințelor de fizică însușite în școală. Ea cuprinde unele dintre cele mai importante principii și legi din fizică, ilustrate, fiecare dintre ele, de exemple, aplicații practice și de scurte biografii ale savanților care le-au descoperit.*

*În partea introductivă a lucrării se discută, succint, despre principii și legi, ipoteze și teorii, relații de definiție. Deoarece clasificarea în principii și legi ale fizicii este oarecum relativă, autorul a preferat ca prezentarea acestora, din motive istorice și deci respectînd tradiția, să fie făcută folosind terminologia existentă în literatura de fizică.*

*Lucrarea este împărțită în cinci capitole, după cum urmează: Capitolul I — Principii; Capitolul II — Legi ale căror expresii matematice cuprind constante universale; Capitolul III — Legi ale căror expresii matematice cuprind constante*

[1] „Cel care a depășit prin geniul lui neamul omenesc", inscripție pe statuia lui Isaac Newton, de la Trinity College din Cambridge.

*caracteristice materialelor; Capitolul IV — Legi de conservare; Capitolul V — Întrebări și răspunsuri.*

*Expunerea principiilor și a legilor fizicii este detaliată, fără a avea pretenția că este exhaustivă, iar cele 26 de întrebări, cu răspunsurile lor, sînt însoțite de ilustrații explicative.*

*Întrucît legile fizicii se exprimă prin relații matematice, care servesc la aplicarea lor în practică, la utilizarea lor în tehnică, în viața de toate zilele, la rezolvarea diferitelor probleme, în text a fost folosit aparatul matematic respectiv, dar într-o astfel de măsură încît să nu încarce inutil lectura.*

*Legile fizicii sînt verificate întotdeauna în desfășurarea fenomenelor și a proceselor pe care le reprezintă; aceasta înseamnă că ele reflectă realitatea obiectivă.*

*În final, scopul lucrării este acela de a cultiva la cititori modul de gîndire al fizicii, raționamentele ei. Însușirea principiilor și a legilor fundamentale ale fizicii va facilita cititorilor explicarea multora dintre fenomenele și procesele care au loc în natură.*

*Ca și în cazul lucrării precedente „Efecte fundamentale în fizică"*[1], *și de această dată s-au avut în vedere cele spuse de Voltaire:* O carte nu are rost decît dacă te învață ceva.

[1] Hușanu, Gh. *Efecte fundamentale în fizică*. Edit. Albatros, București, 1975.

# INTRODUCERE

*„Physical law should have mathematical beauty".*

*(Legea fizică trebuie să aibă frumusețe matematică.)*

P.A.M. Dirac

Folosindu-se de observații și experiențe, oamenii de știință din toate timpurile au studiat natura, meditînd asupra fenomenelor ce se produc și a legăturii dintre acestea, atît din dorința de a cunoaște — trăsătură esențială a ființei umane —, din curiozitate, cît și din motive practice pentru a-și face viața cît mai sigură și confortabilă.

Prin observație s-au studiat fenomenele din natură așa cum se desfășoară ele, spontan, fără intervenția omului, făcîndu-se descoperiri, care, ulterior, au fost transpuse în *principii* sau în *legi* (o distincție între aceste categorii a fost făcută destul de tîrziu). Așa a descoperit Arhimede faimosul principiu care-i poartă numele, denumit tot mai adesea legea lui Arhimede; tot observația l-a condus pe Newton la descoperirea legii gravitației universale ș.a.m.d.

Ulterior, folosindu-se aparatură adecvată, tot mai perfecționată, s-a căutat să se cerceteze în condiții de laborator cauzele fenomenelor descoperite prin observație, factorii care determină producerea lor, obținîndu-se astfel o serie de rezultate ce reprezintă, de fapt, date privind mărimile caracteristice ale fenomenelor cercetate. Intrepretarea acestor rezultate, adică analizarea semnificației pe care o au, precum și prelucrarea și generalizarea lor, exprimarea matematică a legăturii dintre mărimile ce caracterizează fenomenul, au condus la *legea fizică*. Așadar, experiențele completează observația. Făcînd numeroase experiențe, Galileo Galilei a reușit să descopere legile căderii libere a corpurilor. Tot experiențele de laborator au condus la stabilirea legii Boyle-Mariotte, a legii lui Ohm și a multor altora. În toate cazurile, multitudinea experiențelor a condus totdeauna la un același rezultat. Prin urmare, în asemenea cazuri *legea fizică a fost extrasă* din *multitudinea faptelor experimentale* și nu pe cale matematică, prin demonstrație. Există însă și cazuri cînd

teoria a luat-o înaintea observației, așa cum s-a întîmplat cu ecuația lui Dirac (care postula existența pozitronului); dar tot experiența a fost în cele din urmă „piatra unghiulară" a veridicității. Indiferent, însă, de modul în care au fost stabilite, legile (și teoriile care le înglobează) trebuie să fie confirmate de practică, cu ajutorul lor trebuie să se poată explica fenomenele naturale; legile și teoriile fizice trebuie, mai devreme sau mai tîrziu, să-și găsească aplicații în practică, în tehnică.

*Legea fizică exprimă legătura dintre mărimile fizice ce caracterizează un fenomen.* Orice lege din fizică poate fi exprimată atît calitativ (printr-un enunț), cît și cantitativ (prin una sau mai multe relații matematice). Iată cîteva exemple:

— *Legea gravitației,* formulată de Newton, se enunță astfel: *modulul forței de atracție reciprocă dintre două corpuri de masă $m_1$ și $m_2$ este direct proporțional cu produsul acestor mase și invers proporțional cu pătratul distanței dintre centrele lor de masă.* Relația matematică corespunzătoare este

$$F = k \frac{m_1 m_2}{R^2},$$

$k$ fiind o constantă de proporționalitate, universală, care nu depinde de proprietățile celor două corpuri sau ale mediului și nici de temperatură.

— *Legea Boyle-Mariotte: pentru aceeași masă de gaz, la temperatură constantă, produsul dintre presiunea gazului și volumul său este constant;* formula matematică este

$$pV = \text{const.}$$

— *Legea Biot-Savart: inducția magnetică* B *într-un punct la distanța* r *de axa unui conductor rectiliniu și infinit de lung, parcurs de un curent electric* I *este direct proporțională cu intensitatea curentului și invers proporțională cu distanța* r; matematic se scrie

$$B = 2\mu k \frac{I}{r},$$

unde

$$k = \frac{1}{4\pi}.$$



Cu secole în urmă, în fizică, legile se descopereau accidental, iar formulele matematice care le reprezentau erau stabilite empiric, pe baza corelării observațiilor, a rezultatelor unor experimente repetate. Ulterior, teoria devenind o parte integrantă a cercetării științifice, multe dintre aceste formule empirice au fost găsite drept cazuri limită sau particulare ale unor relații mai generale. Exemple de astfel de legi sînt: *legea lui Coulomb,* care a fost demonstrată cu ajutorul legii (denumită pînă de curînd teoremă) lui Gauss (din electrostatică); *legea Biot-Savart,* demonstrată cu ajutorul legii lui Laplace (în electromagnetism); *legile gazelor perfecte,* demonstrate cu ajutorul teoriei cinetice a gazelor perfecte ș.a.

Legile prezintă diferite grade de generalitate, aceasta depinzînd, evident, de domeniul lor de acțiune. Sînt legi a căror sferă de acțiune este limitată numai la fizică și ele sînt legate de o anumită formă fundamentală de mișcare. Dar există legi a căror acțiune se extinde la întreaga natură; de exemplu, *legea conservării energiei totale a unui sistem.*

Odată cu dezvoltarea fizicii teoretice, tot mai multe legi din fizică au fost descoperite întîi pe cale teoretică și apoi verificate experimental.

Există încercări de a face o clasificare a legilor fizice, dar problema nu poate fi considerată ca fiind elucidată. De exemplu, unii autori iau în considerare *legi de stare* și *legi de desfășurare.* Primele exprimă relații simultane între mărimi de stare, cum este cazul *legii lui Ohm,* celelalte exprimă relații între evenimente nesimultane, constituind expresii parțiale ale *cauzalității.* Ca exemplu de legi de desfășurare dăm *ecuațiile cîmpului electromagnetic, ecuațiile mișcării mecanice.*

Alți autori clasifică legile fizice în *legi fundamentale, legi de material, legi de conservare* sau în *legi dinamice,* adică legi care se aplică fenomenelor și proceselor individuale luate în parte (de exemplu *legile căderii libere a corpurilor*) și *legi statistice,* care se aplică numai la fenomene de masă (de exemplu *legile microcosmosului*).

Autorul nu și-a propus să elucideze această problemă care poate face subiectul unei alte lucrări, la care ar trebui să participe, pentru elaborare, un colectiv de specialiști, de metodiști.

Atragem, însă, atenția cititorilor că în fizică există legi în a căror expresie matematică intervin constante universale,

ca în expresia *legii gravitației universale*, în expresia *legii fundamentale a dinamicii* $\left(\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}\right)$, și legi în a căror expresie matematică intervin constante caracteristice materialelor. Așa este *legea lui Ohm*, unde rezistența electrică $R$ depinde de rezistivitatea materialului conductor $\rho$, *legea lui Hooke* în care intervine $E$, care reprezintă modulul de elasticitate (modulul lui Young) al materialului ș.a. Acest criteriu a fost ales de autor în prezentarea lucrării de față. Desigur că acesta nu este singurul criteriu, singurul mod de prezentare.

Mai atragem atenția cititorilor că cele mai generale legi sînt *legile dialecticii*. Acestea sînt legi universale, ele aplicîndu-se atît în domeniul naturii cît și în domeniul social și gîndirii. Legile dialecticii se manifestă prin legi mai puțin generale, însă nu se substituie acestora.

Forma matematică a legilor fizice trebuie să se mențină independentă față de diversele convenții ce se fac în vederea măsurării mărimilor fizice care intervin în expresia matematică a lor, deoarece legile fizice au caracter *obiectiv*. Așadar, forma legilor fizice trebuie să rămînă *invariantă* atunci cînd se face trecerea de la un grup de convenții la altul, adică atunci cînd se efectuează o *transformare*.

Invarianța legilor fizice față de diversele sisteme de unități de măsură se asigură prin *omogenitatea* relațiilor matematice care exprimă aceste legi fizice. Omogenitatea unei relații constă în aceea că ambii membri ai relației trebuie să aibă aceleași dimensiuni. De exemplu, formula perioadei pendulului gravitațional trebuie scrisă numai sub forma

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

deoarece, $[T] = T$, $[l^{1/2}] = L^{1/2}$, $[g^{1/2}] = L^{1/2}T^{-1}$ și $[2\pi] = L^0M^0T^0$ și deci

$$\left[2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\right] = T.$$

Folosind formulele dimensionale și criteriul omogenității relațiilor fizice, Einstein a stabilit[1] o formulă cu ajutorul

[1] Annalen der Physik, vol. 35, 1911, p. 688.



căreia a calculat frecvența de vibrație a atomilor într-un corp solid, rezultatele fiind verificate pe alte căi.

Translația, rotația, transformările de la un triedru drept la un triedru stîng, simetria în raport cu schimbarea semnului timpului, transformările conforme ș.a. sînt cazuri în care prezintă interes invarianța legilor.

Au fost situații în care s-a constatat că anumite legi nu sînt invariante față de un anumit tip de transformări. Acestea au constituit *situații cruciale* în fizică și ele au condus fie la o reformulare a legilor, fie la o reformulare a condițiilor de invarianță.

Invarianța legilor fizice conduce la concluzia că există unele mărimi fizice care au în același timp proprietatea de a fi *aditive* și proprietatea de a fi *conservative*. Într-adevăr, în cursul desfășurării unui fenomen, sau în cursul unei transformări pe care o suferă un sistem fizic, valorile variabile ale unor mărimi fizice ce caracterizează fenomenul sau transformarea, mărimi ce intervin în expresia matematică a legii corespunzătoare fenomenului, respectiv transformării, se schimbă. Dar există și mărimi care, în cursul desfășurării unui fenomen, în cursul transformării unui sistem, au proprietatea de a fi aditive și de a-și păstra neschimbată valoarea, deci de a fi conservative.

*Legile care exprimă caracterul aditiv-conservativ al unor mărimi fizice, în cursul unei transformări*, se numesc *legi de conservare*.

*Legile de conservare sînt legi generale ale naturii*. Unele dintre ele, de exemplu *legea conservării energiei totale a unui sistem, legea conservării impulsului total al unui sistem*, se aplică tuturor fenomenelor, indiferent de scara dimensiunilor (macroscopice sau microscopice); altele, însă, au o aplicabilitate limitată, fără ca aceasta să le scadă din generalitate, din valabilitate. Așa sînt: *legea conservării numărului barionic, legea conservării parității, legea conservării stranietății* și altele, din domeniul particulelor elementare. Fiecare dintre aceste legi de conservare reprezintă, de fapt, o formă particulară a *legilor generale de conservare a materiei și a mișcării acesteia*. Legile de conservare au nu numai o importanță principială, ci și din punct de vedere aplicativ. Principială deoarece pun în evidență ceea ce este permanent în varietatea mișcării materiei; din punct de vedere aplicativ sînt utile datorită faptului că în fiecare capitol al fizicii

ele formează un sistem compatibil de ecuații care cuprind mărimi fizice, din rezolvarea căruia rezultă valori ale mărimilor în starea ulterioară unei interacțiuni, din valorile mărimilor ce descriu starea anterioară a interacțiunii.

*Principiile generale*, în fizică, *reprezintă adevăruri care se impun datorită faptului că nu sînt infirmate de experimente.* Ele nu sînt extrase din experimente, așa cum sînt legile fizice. Putem spune că *principiile sînt axiomele fizicii.* Principiile nu se pot demonstra direct, dar pot fi verificate prin oricare din consecințele lor.

Exemple de principii: *principiul relativității în mecanica clasică, principiile teoriei relativității restrînse (speciale), principiile teoriei generale a relativității, principiul complementarității, principii de simetrie și legile de conservare corespunzătoare.*

Există principii care prin tradiție își păstrează denumirea, cu toate că între timp au fost demonstrate pe baza altor principii. Așa sînt, de exemplu, *principiul lui Arhimede, principiul lui Pascal, principiul Huygens-Fresnel, principiul lui Le Chatelier, principiul de combinare* ș.a.

În fizică se întîlnesc, alături de principii și legi, *ipoteze* și *teorii. Ipotezele* sînt presupuneri, explicații formulate pe baza unor fapte, fenomene, observații cunoscute. Ipotezele se referă la esența, cauza, legea, mecanismul intern al fenomenelor. Spre deosebire de principii sau legi, ipotezele se bazează pe un număr relativ mic de fapte și observații. De aceea, ele au valabilitate provizorie. Ipotezele pot fi confirmate sau infirmate de experimente, pot fi demonstrate sau nu, mai devreme ori mai tîrziu. Cînd ipotezele sînt confirmate de experimente, ele devin principii, legi sau *teorii.* De exemplu, *ipoteza lui Avogadro* a devenit lege, purtînd numele autorului *(legea lui Avogadro)*, după ce a fost demonstrată matematic cu ajutorul teoriei cinetice a gazelor perfecte. Pînă la sfîrșitul secolului trecut exista doar *ipoteza cinetică moleculară a gazelor,* în timp ce astăzi vorbim de *teoria cinetică a gazelor. Ipoteza cuantelor,* formulată de către Max Planck în anul 1900, a devenit *teoria cuantelor,* unul dintre pionerii acesteia fiind Albert Einstein.

Cînd o ipoteză este infirmată de experiențe, ea este abandonată și deseori înlocuită cu alta. Așa s-a întîmplat cu ipotezele asupra eterului: *eterul cosmic, eterul luminos, eterul electromagnetic.* Toate au fost abandonate după comu-



nicarea rezultatului negativ al experiențelor lui Michelson (1881) și Michelson-Morley (1887)[1].

Între mărimi fizice există relații și de alt tip decît acelea care exprimă legi fizice. Aceste relații servesc la introducerea a noi mărimi fizice și se numesc *relații de definiție.* Dăm cîteva exemple de mărimi fizice introduse prin relații de definiție: $\rho = \frac{dm}{dV}$ și reprezintă *densitatea de masă,* $\rho = \frac{dq}{dV}$ și reprezintă *densitatea volumică de sarcină electrică,* $I = \frac{dq}{dt}$ și reprezintă *intensitatea curentului electric,* $l = \int n ds$ și reprezintă *drumul optic.*

În încheiere precizăm că în studiul principiilor și al legilor fizicii, al fizicii în general, matematica este indispensabilă, deoarece numai cu ajutorul ei putem exprima cantitativ legile, principiile și se pot rezolva probleme practice, tehnice.

[1] Vezi „Principiile teoriei relativității restrînse" din prezentul volum, la p. 22–44.

# PRINCIPII

*„Termodinamica..., este singura teorie fizică cu conținut universal de care sînt convins că, în limitele aplicabilității noțiunilor ei de bază, nu va fi niciodată răsturnată".*

A. Einstein

*„Contraria non contradictoria sed complementa sunt".*

*(Laturile contrare nu sînt contradictorii, ci sînt complementare.)*

N. Bohr

## PRINCIPIUL RELATIVITĂȚII AL LUI GALILEI

În studiul fenomenelor fizice trebuie, întotdeauna, să se precizeze sistemul de referință (*SR*) față de care se studiază fenomenul respectiv, deoarece descrierea fenomenului depinde de referențialul ales.

După cum se știe, un ansamblu rigid de puncte din spațiu, la care se raportează poziția unui corp în mișcare și căruia i se atașează un sistem de trei axe concurente — de regulă, triortogonale — numite *axe de referință*, reprezintă ceea ce se numește *sistem de referință*. Punctul de concurență a acestor axe este numit *originea axelor* (a sistemului) *de referință*.

*Un sistem de referință considerat imobil sau în mișcare rectilinie uniformă, în care este valabilă legea (principiul) inerției, este un sistem de referință inerțial* (*SRI*).

Un *SR* legat de Pământ, însuși Pământul, este considerat, practic, un sistem de referință inerțial, dar numai cu aproximație inerțial. De ce? Pentru că Pământul are o mișcare de rotație, denumită mișcare diurnă și o mișcare în jurul Soarelui, numită mișcare de revoluție. Datorită acestor mișcări, punctele materiale de pe Pământ și însuși Pământul au o accelerație centripetă. Aceasta produce unele perturbații asupra fenomenelor studiate și, din această cauză, sistemul de referință legat de Pământ nu este un *SR* inerțial propriu-zis.

Un *SRI* mai riguros este cel legat de Soare, numit *sistem de referință heliocentric*. Față de un astfel de referențial se poate studia mișcarea Pământului și se pot calcula corecțiile ce trebuie introduse pentru cazul cînd este luat ca *SRI*.

În concluzie, pentru experiențele uzuale care se fac și pentru precizia care se cere, Pământul — și deci orice referențial legat de el — poate fi luat ca un sistem de referință



inerțial cu o foarte bună aproximație și așa se va proceda în cele ce urmează.

Să ne imaginăm următoarea experiență: într-un vagon de cale ferată pe boghiuri, cu podeaua foarte bine lustruită, se află un observator $O_1$ și pe podea o sferă (de asemenea foarte bine lustruită pentru ca frecările să fie cît mai mici),

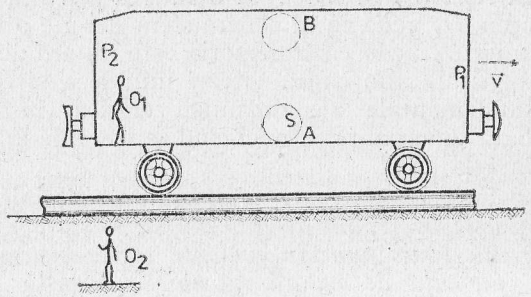



Fig. 1. Pentru înțelegerea principiului relativității al lui Galilei.

plasată în poziția $A$ (fig. 1). Lîngă terasamentul căii ferate stă un alt observator $O_2$, aflat deci în *SRI* care este Pământul. Observatorul $O_1$ este izolat de mediul înconjurător și se presupune că nu există vibrații, porniri și opriri ale vagonului. $O_2$ poate, însă, privi în interior (de exemplu, dacă vagonul are un perete de sticlă și este iluminat în interior, noaptea). Pentru început să presupunem că vagonul nu se mișcă ($v = 0$). Fiecare dintre cei doi observatori va observa că sfera își menține neschimbată poziția, în acord cu legea I a dinamicii. Apoi $O_1$ ridică sfera în poziția $B$ și o lasă să cadă; ca și observatorul din exterior, $O_1$ va observa că sfera în cădere descrie o dreaptă și ajunge întotdeauna în $A$. (Reamintim că $O_1$ nu vede nimic în exteriorul sistemului său de referință.) Să mai presupunem că $O_1$ aruncă sfera din $A$ la peretele $P_1$ și măsoară timpul după care atinge peretele, găsindu-l egal cu $t_1$. Aruncă apoi sfera, tot din $A$, dar înspre peretele $P_2$ și notează timpul după care atinge peretele $P_2$, găsindu-l egal cu $t_2$. Să presupunem acum că vagonul capătă o viteză constantă ($v = \text{const.}$), deci se mișcă rectiliniu și uniform și că $O_1$ repetă toate experiențele. El nu va constata nici o deosebire între rezultatele observațiilor sale. $O_2$, însă, va spune, de exemplu, că atunci cînd sfera este în $A$ ea se mișcă odată cu vagonul, cînd cade

descrie un arc de parabolă cu axa verticală ș.a.m.d. Se pune întrebarea: care din cei doi observatori are dreptate? Răspunsul este unul singur: amîndoi au dreptate, deoarece ambii se găsesc în sisteme de referință diferite.

Prin urmare, fenomenele sînt descrise diferit de cei doi observatori $O_1$ și $O_2$, datorită faptului că se găsesc în sisteme de referință diferite, dar numai în privința detaliilor. De exemplu, $O_1$ vede că în cădere sfera descrie o traiectorie rectilinie, iar $O_2$ vede că traiectoria este un arc de parabolă cu axa verticală, din cauza vitezei inițiale a sferei. Forma legilor fundamentale ale dinamicii clasice, însă, rămîne neschimbată (invariantă) atunci cînd se trece de la un sistem de referință la altul.

În concluzie, *un observator aflat într-un sistem de referință, care se găsește în repaus relativ sau în mișcare rectilinie și uniformă, nu poate pune în evidență starea sistemului prin nici o experiență de natură mecanică*. Această formulare exprimă *principiul relativității în mecanica clasică* sau *principiul relativității al lui Galilei*, deoarece are la bază concluziile experiențelor lui Galilei din anul 1632. Acestea au fost făcute în cabina unei corăbii, la $v = 0$ și cînd avea $v = \text{const.}$ și nu existau fenomene de ruliu (mișcare a unei nave sau a unei aeronave în jurul axei sale longitudinale) sau de tangaj (mișcare alternativă de înclinare a unei nave sau aeronave în sensul lungimii lor). Galilei scria: „Și iată (numai dacă mișcarea vasului este uniformă) nu veți observa nici cea mai mică schimbare în toate fenomenele și nu veți putea aprecia, ținînd seama de vreunul din aceste fenomene, dacă corabia se mișcă sau stă pe loc; sărind, veți parcurge pe podea aceleași distanțe ca și atunci cînd corabia se află în repaus, adică — deoarece corabia se mișcă destul de repede — nu veți face sărituri mai mari spre pupă decît spre prova corăbiei, cu toate că, în timpul cît vă aflați în aer, podeaua de sub voi fuge în partea opusă săriturii sau, aruncînd un obiect oarecare unui prieten, nu va trebui să-l aruncați cu o forță mai mare, dacă el (prietenul) se va afla lîngă prova corăbiei, iar voi lîngă pupă, decît dacă veți ocupa poziții inverse. Picăturile de pe o cană cu apă atîrnată în tavan vor cădea vertical pe podea și nici una din ele nu va cădea în direcția pupei, cu toate că în timpul cît picătura se află în aer, corabia înaintează. Mușteleîși vor continua zborul, indiferent în ce direcție, și niciodată nu se va întîmpla ca ele (ca și cum ar obosi să se tot țină



după mersul rapid al corăbiei) să se strîngă spre partea care este mai aproape de pupă"[1].

Galilei a efectuat aceste cercetări cu dorința de a apăra concepția lui Copernic asupra Sistemului Lumii, concepție după care Soarele se află în centrul sistemului solar, iar Pămîntul și celelalte planete se mișcă în jurul său pe traiectorii eliptice, în unul dintre focare găsindu-se Soarele. Cei care împărtășeau și răspîndeau învățătura lui Aristotel și Ptolemeu, după care Pămîntul este fix în centrul Universului, afirmau că dacă Pămîntul ar fi în mișcare în spațiu atunci fenomenele s-ar desfășura altfel decît le vedem. De exemplu, lăsînd să cadă un corp din vîrful catargului unei corăbii el va ajunge pe puntea vasului într-un loc mai apropiat de pupă (partea de dinapoi a navei). Această afirmație a fost admisă ca valabilă fără ca cineva să se gîndească să experimenteze. Și fiindcă Galilei nu împărtășea părerea acestora se hotărî să demonstreze experimental că nu au dreptate.

În anul 1640, filozoful francez Pierre Gassendi a făcut în mod special o experiență de verificare pe un vas, în timpul mișcării acestuia. El a lăsat să cadă un corp din vîrful catargului și a observat că a căzut la baza acestuia. Apoi a lăsat corpul să cadă și în cazul cînd corabia se afla în repaus. A făcut aceeași constatare. Deci se confirmau rezultatele obținute de predecesorul său.

Galilei nu a exprimat rezultatele observațiilor sale sub forma unei legi. Formularea îi aparține lui Newton. În monumentala sa operă *Principiile matematice ale filozofiei naturale*[2], la pagina 42 corolarul V, Newton scrie: „Mișcările corpurilor incluse într-un spațiu dat sînt aceleași între ele, fie că acel spațiu se află în repaus, fie că el se mișcă rectiliniu și uniform fără mișcare circulară". Și tot aici mai scrie: „Pe o corabie toate mișcările se întîmplă la fel, fie că aceasta este în stare de repaus, fie că se mișcă uniform în linie dreaptă".

Se vede clar că Newton era influențat de concluziile lui Galilei. Totuși de ce nu-l citează pe Galilei? se întreabă unii fizicieni. Credem că singurul răspuns este: o scăpare

[1] S.E. Friș și A.V. Timoreva, *Curs de fizică generală*, vol. I, Editura tehnică, București, 1954, p. 66.

[2] Operă tradusă în limba română de către prof. Victor Marian de la Universitatea din Cluj-Napoca și apărută în Editura Academiei, în anul 1956.

din partea lui Newton. Newton a dat dovadă, pe durata întregii sale vieți, de o mare probitate morală, încît nu și-ar fi putut însuși cu bună știință rezultatele obținute de altcineva. În plus, el avea asemenea realizări încît menționarea lui Galilei n-ar fi fost de natură să umbrească dimensiunile geniului său.

Vom arăta mai departe că orice *SR* în mișcare de translație uniformă față de un *SRI* este și el inerțial. Pe vremuri, fizicienii căutau să descopere un sistem de referință absolut. Ne dăm seama acum că un astfel de sistem de referință nu prezintă importanță, căci, dacă într-adevăr ar exista, el nu ar putea fi găsit, fiindcă nu ar putea fi deosebit de celelalte *SR* care au o mișcare de translație uniformă față de el și deci îi sînt echivalente. *Orice sistem de referință inerțial poate fi considerat ca un sistem de referință în repaus absolut.*

Trecerea de la coordonatele spațiale și temporale ale unui punct dintr-un *SRI* la coordonatele aceluiași punct în alt referențial inerțial se face folosind formulele de transformare ale lui Galilei[1]. Pentru cazul particular, care nu restrînge cu nimic generalitatea rezultatelor, cînd axa $O'x'$ alunecă cu viteza $v = \text{const.}$, în lungul axei $Ox$ (fig. 2), iar axele $O'y'$ și $O'z'$ sînt paralele cu $Oy$, respectiv $Oz$, *relațiile galileene de transformare* sînt

$$x = x' + vt', \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'. \tag{1}$$

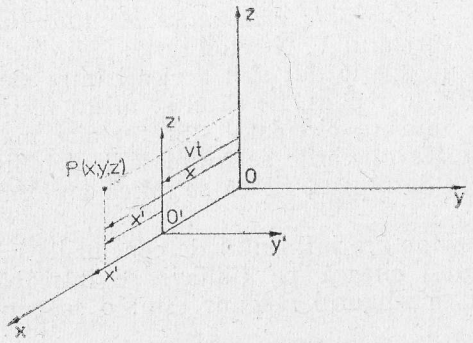



Fig. 2. Pentru înțelegerea formulelor de transformare ale lui Galilei.

[1] Ele au fost denumite astfel la propunerea lui Einstein; pe vremea lui Galilei nu erau numite astfel (vezi: Nicolae Bărbulescu, *Bazele fizice ale relativității einsteiniene*, Editura științifică și enciclopedică, București, 1975, p. 29).



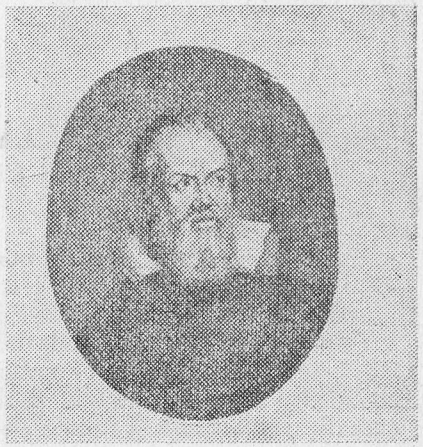
Invers, dacă punctul $P$ s-ar afla în sistemul de referință $xOyz$, trecerea de la coordonatele lui din acest sistem la coordonatele lui din sistemul $x'O'y'z'$ se face după relații similare cu precedentele, adică

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t, \tag{2}$$

referențialele considerate avînd aceeași poziție unul față de celălalt.

Galileo *Galilei* (1564—1642), fizician, astronom și matematician renascentist italian. Este considerat ca întemeietor al mecanicii clasice și al metodei experimentale în știință. Galilei este primul care ajunge la concluzia existenței mișcării accelerate și a mișcării întîrziate și care studiază și stabilește legile lor. La vîrsta de aproape 20 de ani, pe baza unor observații făcute la catedrala din Pisa, descoperă *legea izocronismului micilor oscilații:* a măsurat timpul în care candelabrul oscila, cu ajutorul propriului său puls. Galilei a făcut experiențe privind căderea liberă a corpurilor lăsînd să cadă corpuri diferite din turnul înclinat al aceleiași catedrale și a ajuns la concluzia că acestea cad cu viteze diferite numai din cauza aerului.

Galilei a cercetat apoi căderea liberă a corpurilor pe planul înclinat, determinînd timpul cu ajutorul unei clepsidre cu apă; cantitatea de apă era măsurată prin cîntărire cu ajutorul unei balanțe rudimentare. El a formulat principiul independenței mișcărilor și a studiat mișcarea pe plan orizontal, ajungînd la concluzia că, dacă nu ar exista frecările, corpurile s-ar mișca rectiliniu



**Galileo Galilei**

și uniform și că această mișcare ar dura la infinit, fără a fi necesară o cauză pentru a o întreține. Se vede de aici că Galilei (ca și Aristotel) a intuit legea inerției, lege a cărei formulare actuală aparține lui Newton, care s-a născut în anul încetării din viață a lui Galilei (1642).

Galilei ar fi construit, în anul 1600, primul termometru, care de fapt era numai un termoscop. Acest lucru este menționat de către Viviani, elev al lui Galilei. Alții, însă, îl menționează pe olandezul Drebbel, contemporan cu Galilei, ca fiind autorul primului termometru. Este curios faptul că Galilei nu a revendicat niciodată această invenție. Se presupune, totuși, că el ar fi cunoscut, din scrisorile lui Heron, termoscopul lui Philon. Cine este adevăratul inventator al termometrului nu se știe, însă se cunoaște cu certitudine că în anul 1600, în orașul Florența, se foloseau termometre cu alcool. Aceste instrumente erau etalonate luîndu-se ca limite de temperatură, superioară și inferioară, temperaturile maxime și minime ale aerului atmosferic.

În practica medicală acest instrument a fost folosit pentru întîia oară de către medicul Santorio, care era coleg cu Galilei la Universitatea din Padua.

În anul 1638, Galilei își publică, în Olanda (din cauza Inchiziției), cartea sa intitulată *Tratat despre mecanica mișcărilor*. Prin această operă Galileo Galilei face un pas înainte în dezvoltarea fizicii, în sensul că pune bazele metodei de cercetare experimentală. Cu șase ani mai înainte însă (1632), descoperă *principiul relativității*, valabil pentru fenomene mecanice și cunoscut sub denumirea de *principiul mecanic al relativității* sau *principiul relativității al lui Galilei*.

## PRINCIPIILE TEORIEI RELATIVITĂȚII RESTRÎNSE ALE LUI EINSTEIN

Unul dintre cele mai importante principii din fizica modernă este principiul relativității (restrînse și generale), formulat de către Albert Einstein.

Principiul galileean al relativității are valabilitate limitată, deoarece se referă numai la fenomene mecanice. Extinderea acestui principiu și la fenomene de altă natură, generalizarea lui, a fost făcută de către Einstein la începutul



secolului nostru. Studiind principiul relativității al lui Galilei, rezultatele experienței lui Michelson din 1881, a experienței Michelson-Morley din 1887, precum și lucrările lui Lorentz, Einstein — cu admirabila-i intuiție — reușește să reformuleze principiul relativității, extinzîndu-l și asupra fenomenelor de natură electrică, luminoasă etc., și punîndu-l apoi la baza teoriei relativității (restrînse, speciale), teorie pe care o face cunoscută în anul 1905. Totodată, Einstein formulează încă un principiu, care — așa cum vom vedea la momentul oportun — este în dezacord cu mecanica clasică, newtoniană. Așadar, în cele ce urmează vom arăta faptele care l-au condus pe Einstein la formularea principiilor care stau la baza teoriei relativității speciale, precum și crearea acestei teorii.

Albert *Einstein*, fizician german, s-a născut la Ulm (Germania) în ziua de 14 martie 1879.

Pe cînd avea patru sau cinci ani, tatăl său îi dădu o busolă. Uitîndu-se îndelung la ea, copilul Albert spuse: „Cred că în jurul acului există ceva care îl împinge". Mult mai tîrziu Einstein își amintea întîmplarea cu busola astfel: „... a fost primul contact cu lumea mare, existentă în afara noastră și independent de noi, care ne apare ca o taină uriașă și veșnică... Dincolo de lucruri trebuie să existe ceva, adînc ascuns"[1].

**Albert Einstein**

[1] Vl. Lvov, *Viața lui Albert Einstein*, Editura științifică, București, 1960, p.6.

La vîrsta de 9 ani a fost trimis la școala primară catolică, iar cînd a împlinit 12 ani a trecut la liceul Lintpold. După ce-și termina lecțiile, Albert cînta la vioară. Îi plăcea mult Beethoven. Cînd a trecut în al patrulea an de liceu, unchiul său Jakob i-a făcut cadou un manual de geometrie legat în carton tare. Începe să citească acest manual și nu-l lasă pînă nu-l termină. A încercat să facă demonstrațiile pe altă cale decît în carte și a fost tare mulțumit.

La un moment dat a primit de la un student rus o carte intitulată „Forță și materie". Mult mai tîrziu Einstein menționa, în autobiografia sa, că citirea acestei cărți a avut drept consecință o liberă cugetare de-a dreptul fantastică.

În august 1900, după ce absolvă Politehnica din Zürich, pleacă la Milano în căutare de lucru. În anul 1901 revine la Zürich, unde primește cetățenia acestui oraș[1] și își publică primul său articol științific în *Analele de fizică*, cu titlul: „Consecințe ale fenomenelor de capilaritate". În anul 1902 reușește cu foarte mare greutate să obțină un post de funcționar la Biroul de patente din Berna. Aici se preocupă de cercetările sale începute încă în vremea studenției. La Biroul de patente a lucrat între anii 1902—1909. Între anii 1902—1903 a formulat teoremele fundamentale ale mecanicii statistice, teoreme din care a dedus principiile termodinamicii. Un an mai tîrziu (1904) Einstein își publica lucrarea „Teoria moleculară a căldurii", iar în 1905 publică lucrarea „Despre mișcarea particulelor în suspensie, în lichide aflate în repaus, conform cu teoria molecular-cinetică". În același an susține teza de doctorat cu tema „O nouă determinare a dimensiunilor moleculare". Tot în 1905 apar o serie de alte articole științifice, între care „Asupra electrodinamicii corpurilor în mișcare", articol apărut, ca și celelalte, în „Annalen der Physik". Mai publică și un articol consacrat formulei $E = mc^2$. În 1906 publică cinci articole despre problemele de electrodinamică și de teorie moleculară (în aceeași revistă), iar în 1907 publică un articol ce constituie începutul lucrării despre gravitație. În 1908 este numit privat-docent la Universitatea din Berna. În toamna anului 1909 este numit profesor extraordinar al Universității din Zürich și deci părăsește Biroul de patente, iar la 11 decembrie 1909 ține prima prelegere. Între 1911—1912 își publică 15 articole științifice, în martie 1911 este numit profesor titular la Universitatea din Praga, iar în 1912, toamna, revine la Zürich ca profesor la Politehnică. În 1913 apar 7 articole

[1] Această cetățenie a păstrat-o întreaga viață, în pofida faptului că a trăit mulți ani în Germania și în S.U.A.



științifice ș.a.m.d. Este imposibil de enumerat articolele sale. De altfel, numărul cărților și articolelor publicate de Einstein numai cu privire la teoria relativității se ridică la peste 5 000 și sînt cunoscute sub denumirea de *einsteiniana*.

În anul 1933, odată cu venirea lui Hitler la putere, Einstein este silit să emigreze în S.U.A., unde a trăit pînă la sfîrșitul vieții. Aici a funcționat ca profesor la Universitatea din Princeton (statul New Jersey).

În afara preocupărilor privind teoria relativității restrînse și generale, Einstein a explicat legile acțiunii chimice a luminii, efectul giromagnetic (numit și efect Einstein-De Haas; 1915), a dat teoria efectului fotoelectric. Prin activitatea sa, prin rezultatele obținute, Einstein a dat răspuns unora dintre cele mai acute probleme ale fizicii moderne.

În anii 1931—1940, Einstein a luat parte activă la campania antirăzboinică și antifascistă, alături de Maxim Gorki, Romain Rolland și Henri Barbusse. În ultimii ani ai vieții el s-a opus folosirii armelor atomice și s-a pronunțat pentru controlul internațional al energiei atomice.

În anul 1945, la 6 și 9 august, două bombe atomice sînt lansate asupra orașelor japoneze Hiroshima și Nagasaki, distrugîndu-le complet și, în același timp, omorînd circa 200 000 de oameni nevinovați. Într-un discurs radiotelevizat, din august 1945, Einstein spunea: „Dacă aș fi știut că nemții nu vor crea bomba atomică, n-aș fi făcut nimic pentru bombă"[1]. El a protestat împotriva acestei acțiuni prin intermediul corespondentului ziarului „New York Times". Einstein a protestat și împotriva hotărîrii guvernului american de a produce bomba cu hidrogen.

În anul 1921, Einstein a fost laureat cu Premiul Nobel pentru „teoria relativității și a efectului fotoelectric".

În ziua de 15 aprilie 1955, Einstein se îmbolnăvește și este internat în spitalul din Princeton. Medicii optau pentru operație, dar Einstein se opune. Boala se agravă și în ziua de 18 aprilie a anului 1955, ora 1 și 25 minute, inima marelui geniu, a aceluia care a avut neobișnuitul curaj de a ataca mecanica lui Newton ce stăpînea lumea fizică de două secole, încetă să mai bată. Avea 76 ani.

În autobiografia sa, dedicată memoriei marelui Newton, Einstein scria: „Iartă-mă, te rog, Newton! Tu ai găsit singura cale posibilă pentru timpul tău și care era accesibilă numai unei

[1] Vezi *Viața lui Albert Einstein* de Vl. Lvov, trad. din limba rusă, Editura științifică, București, 1960, p. 288.

minți geniale, ca a ta... Noțiunile create de tine conduc încă și astăzi gîndirea noastră „fizică". Însă astăzi noi știm deja că pentru o cunoaștere mai profundă a legăturilor universale trebuie să înlocuim noțiunile tale cu altele mai îndepărtate de sfera experienței directe"...

În legătură cu Einstein se povestesc nenumărate întîmplări. Astfel, se spune că într-una din zile Einstein se dusese la un restaurant să servească masa. Cum nu avea ochelarii la el, a rugat pe un cetățean de la masă să-i citească preparatele de pe lista cu meniul zilei. Acesta, însă, îi spuse: „Regret, dar ca și dumneavoastră, nu știu să citesc".

La baza mecanicii relativiste (a teoriei relativității restrînse) stau două principii, denumite și *principiile lui Einstein*, deoarece au fost formulate pentru prima dată de către Albert Einstein, în anul 1905, în lucrarea „Asupra electrodinamicii corpurilor în mișcare", publicată în *Annalen der Physik*[1], tot așa cum la baza mecanicii clasice stau cele trei principii fundamentale ale lui Newton[2] (sau *axiome*, cum le-a denumit acesta).

Dar legile lui Newton sînt valabile numai dacă le raportăm la un *spațiu absolut*, la un sistem de referință fix în acest spațiu. Ele păstrează aceeași formă și în sistemele de referință care au față de acest spațiu o mișcare rectilinie și uniformă. Așadar, Newton avea în vedere existența unui *spațiu absolut*. Și timpul era considerat ca absolut de către Newton. Dar mai bine să vedem ce scrie Newton în opera sa fundamentală, la pagina 30—31, în ediția citată, despre timp, spațiu și loc:

„...*Timpul absolut*, adevărat și matematic, în sine și după natura sa, curge în mod egal fără nici o legătură cu ceva extern, și cu un alt nume se cheamă durată... Timpul absolut se deosebește de cel relativ în astronomie prin ecuația timpului obișnuit...

...*Spațiul absolut*, considerat în natura sa, fără nici o relație cu ceva extern, rămîne totdeauna asemenea și imobil... Spațiul relativ este o măsură sau o parte oarecare mobilă a celui absolut, care se relevă simțurilor noastre prin poziția sa față de corpuri și de obicei se confundă cu spațiul imobil.

[1] A. Einstein, *Teoria relativității*, Editura tehnică, București, 1957, p. 34—38.

[2] Vezi *Principiile matematice ale filozofiei naturale* de Isaac Newton, apărută în limba română în anul 1956, p. 37.



...*Locul* este o parte a spațiului pe care o ocupă corpul și este sau absolut sau relativ după cum este spațiul..."

În teoria relativității, însă, spațiul și timpul sînt considerate ca noțiuni relative, așa cum se va arăta mai departe. Teoria relativității a apărut ca urmare a readucerii în discuția fizicienilor și filozofilor a principiului relativității al lui Galilei; ea era, însă, pregătită prin cercetările ce au fost făcute asupra propagării luminii prin ipoteticul mediu cosmic *eterul*.

Pentru a înțelege ce a însemnat teoria relativității în evoluția fizicii este necesar să facem unele considerații asupra concepțiilor premergătoare ei.

*Max Born*[1] scrie: „...principiul relativității restrînse nu a fost o descoperire a unui singur om. Einstein a pus ultima cărămidă la construcția pe care au zidit-o Lorentz, Poincaré și alții și pe temelia căreia și-a ridicat clădirea Minkovski. Găsesc că nu este drept ca toți acești oameni să fie uitați".

Așa cum arată Max Born, principiul relativității a fost cunoscut și de către Lorentz și Poincaré și deci nu aparține exclusiv lui Einstein. Dar lui *Einstein* și *numai lui* îi aparține, însă, *teoria relativității*.

În privința eterului, acel ipotetic mediu cosmic despre care se presupunea că umple întregul Univers, inclusiv corpurile transparente, se poate spune că el era considerat în filozofia lui Aristotel ca unul din cele cinci elemente (al cincilea) ce alcătuiesc lumea și din care sînt formate corpurile cerești. Eterul a fost și în atenția lui Descartes și chiar a lui Newton, dar acesta din urmă îl considera numai în probleme de optică.

În optică, paralel cu teoria corpusculară a luminii elaborată de Newton, a fost dezvoltată teoria ondulatorie a luminii, de Huygens, publicată la Leyda în anul 1690 în cartea sa intitulată *Traité de la lumière* (Tratat despre lumină). Aici el scrie: „Lumina se propagă ca și sunetul prin suprafețe și unde sferice; eu numesc aceste suprafețe *unde*, prin analogie cu undele care se observă la suprafața unei ape liniștite în care se aruncă o piatră".

Huygens a făcut analogia și între propagarea sunetului și propagarea luminii arătînd că, așa cum undele sonore se propagă prin aer, deci printr-un mediu elastic ce con-

[1] Max Born, *Fizica în concepția generației mele*, Editura științifică, București, 1969, p. 242.

stituie suportul undelor, tot așa și lumina are nevoie de un suport material, de un mediu material prin care să se propage. Acest mediu era considerat a fi *eterul*. Dar ipoteza undelor luminoase nu avea susținători. Oamenii de știință acceptaseră cu greu teoria corpusculară a luminii și aceasta mai mult datorită marii autorități a lui Newton. De-abia prin anul 1801, Young, în experiența sa de importanță istorică, prin care pune în evidență fenomenul de interferență a luminii, aduce dovada de necontestat că lumina este un fenomen ondulatoriu, deci că se propagă prin unde. Au urmat apoi celebrele experiențe ale lui Fresnel, care au pus în evidență interferența și difracția luminii și prin aceasta natura ondulatorie a luminii. Fresnel s-a ocupat și de proprietățile „eterului" și de posibilitatea propagării luminii prin el, denumit din această cauză „eter luminos". Fenomenele de polarizare și de interferență a luminii polarizate au condus la concluzia că lumina este o undă transversală. Apărea acum marea întrebare: dacă lumina este o undă transversală, cum se poate propaga prin „eter", care era considerat un mediu fluid? Se știe că undele mecanice transversale sînt însoțite în propagarea lor de fenomene de îndoire și fenomene de forfecare în mediul de propagare, produse, la rîndul lor, de forțe de îndoire și forțe de forfecare. Or, numai mediile solide pot fi supuse la astfel de forțe. Pentru a explica, totuși, propagarea luminii prin „eter" i s-au atribuit acestuia proprietăți speciale[1], proprietăți pe care fizicienii au încercat în zadar să le pună în evidență. Totuși, în anul 1818, Fresnel reușește, pe baza unei teorii destul de coerente, să demonstreze o proprietate interesantă și anume aceea că „eterul" este antrenat parțial de către corpurile aflate în mișcare, stabilind și o formulă în care intervine un așa-numit *factor de antrenare*

$$\alpha = 1 - \frac{1}{n^2},$$

$n$ fiind indicele de refracție al mediului ce antrenează „eterul". Un compatriot al său, Fizeau, în 1851 face o experiență de mare importanță pentru fizică avînd ca scop verificarea

[1] Ca imponderabilitate, elasticitate ș.a. Însăși antrenarea eterului de către corpurile în mișcare era considerată o proprietate fizică a acestuia. Proprietățile atribuite eterului erau, însă, contradictorii.



teoriei lui Fresnel. Rezultatele experienței lui Fizeau erau în bună concordanță cu teoria lui Fresnel. Pentru aer, $n = 1$ și deci $\alpha = 0$, ceea ce înseamnă că „eterul" nu este antrenat de aerul atmosferic în mișcare, odată cu Pămîntul (în opoziție cu ipoteza lui Hertz după care „eterul" este *antrenat total* de corpurile în mișcare); din această cauză nu se poate pune în evidență mișcarea „eterului". Lorentz era de altă părere și anume el considera că „eterul" nu ia parte la mișcarea corpurilor, că acest mediu ipotetic este imobil. Așa fiind, s-ar putea considera un *SR* legat de „eter" și față de el ar putea fi determinată viteza absolută a unui corp, deci s-ar putea pune în evidență mișcarea absolută a corpurilor; corpurile, în mișcare, ar produce un vînt de „eter", care prin anumite procedee ar putea fi pus în evidență. Acestea erau ipotezele principale cu privire la „eterul" cosmic.

Mai tîrziu s-a dezvoltat ipoteza „eterului electromagnetic", conceput ca un mediu în care au loc fenomenele din jurul corpurilor electrizate sau magnetizate. În acea vreme mai dăinuia încă ipoteza „eterului luminos" și concepția lui Newton, a acțiunii la distanță. Tocmai în scopul înlăturării ipotezei „eterului luminos" și a concepției lui Newton a fost imaginat „eterul electromagnetic". Dar după ce s-a descoperit că undele luminoase sînt de natură electromagnetică, „eterul luminos" a fost identificat cu „eterul electromagnetic", considerîndu-se faptul că există un singur „eter" și că prin eter se propagă fenomenele electromagnetice, magnetice și electrice.

În anul 1881, fizicianul american A. A. Michelson a făcut o experiență crucială *(experimentum crucis)* prin care a urmărit punerea în evidență a mișcării absolute a Pămîntului față de „eterul" considerat imobil. Experiența a fost reluată în anul 1887, împreună cu colaboratorul său E. W. Morley, apoi în 1905 de către Miller și în 1925 de către Joos. Experiența a fost imaginată de Maxwell și tot el a recomandat folosirea, în acest scop, a aparatului inventat de Michelson numit *interferometru*. De cea mai mare importanță este însă experiența lui Michelson și Morley din 1887 (pe atunci Einstein avea opt ani). Ei au folosit aparatul a cărui funcționare are la bază fenomenul de interferență a

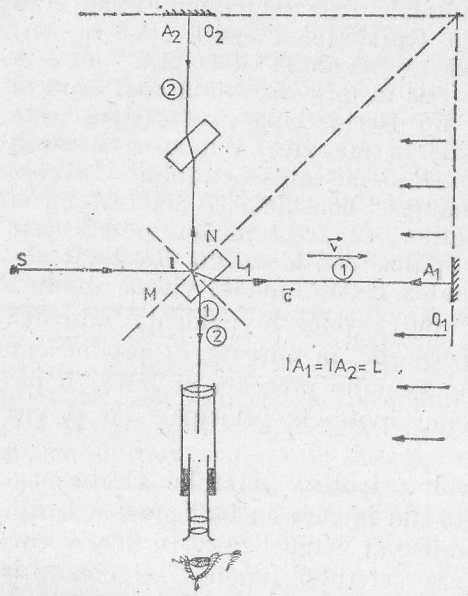



Fig. 3. Experiența Michelson-Morley.

luminii, numit *interferometru Michelson* (fig. 3). Aparatul era așezat mai întîi în așa fel încît brațul longitudinal $IA_1$ să fie paralel cu direcția mișcării de translație a Pămîntului în jurul Soarelui (cu viteza de 30 km/s); brațul $IA_2$ era transversal pe această direcție. Vom nota cu $L$ lungimea brațelor interferometrului, $IA_1 = IA_2 = L$. Direcția și sensul mișcării de translație a Pămîntului corespund direcției și sensului indicat de săgeată.

Fie $\vec{v}$ viteza de translație a Pămîntului față de „eter", și $\vec{c}$ viteza de propagare a luminii față de interferometru. Timpii în care lumina parcurge dus-întors brațul longitudinal și, respectiv, pe cel transversal al interferometrului, măsurați de către observatorul care face experiența, sînt

$$t_l = \frac{\frac{2L}{c}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{2L}{c(1-\beta^2)} \qquad (3)$$



și

$$t_t = \frac{2L}{c\sqrt{1-\beta^2}}; \quad \left(\beta = \frac{v}{c}\right) \qquad (4)$$

iar raportul lor

$$\frac{t_t}{t_l} = \sqrt{1-\beta^2} \text{ sau } t_t = kt_l.$$

Dacă, însă, ar exista un observator în sistemul de referință legat de „eter", care este $SR$ fix în spațiu și acest observator ar face calcule similare, se poate demonstra că ar obține întocmai formulele (3) și (4).

Dar, $k = \sqrt{1-\beta^2} < 1$, deoarece $c \gg v$ și, deci, $t_t < t_l$. Prin urmare, timpul în care lumina parcurge brațul $IA_2$ este mai scurt decît timpul în care lumina parcurge brațul $IA_1$. Undele luminoase ce corespund razelor *1* și *2* interferă și în lunetă se observă o figură de interferență constînd dintr-un ansamblu de franje alternativ luminate și întunecate. În cazul existenței „vîntului de eter", care, de exemplu, ar avea sensul dinspre dreapta, arătat în figura 3, deoarece lumina de la $I$ la $A_1$ propagîndu-se contra „vîntului de eter" ar fi ușor întîrziată față de cea de la $I$ la $A_2$, interferența undelor ar fi distructivă, total sau parțial și deci în cîmpul lunetei ar trebui să se observe un minim intens. Dacă, însă, „vîntul de eter" ar fi inexistent, în cîmpul lunetei, ca urmare a unei interferențe constructive, ar trebui să apară un maxim intens. Numai că în experiența Michelson și Morley[1] nu apăreau doar un maxim sau un minim, ci o figură de interferență, care trebuia să se deplaseze la rotirea aparatului, așa cum vom vedea mai departe.

Întrucît $c \gg v$, relațiile (3) și (4) se pot aproxima

$$t_l = \frac{2L}{c}(1-\beta^2)^{-1} = \frac{2L}{c}(1+\beta^2)$$

$$t_t = \frac{2L}{c}(1-\beta^2)^{-1/2} = \frac{2L}{c}\left(1+\frac{1}{2}\beta^2\right)$$

unde $2L/c$ este timpul în care lumina ar parcurge fiecare braț, dus-întors, în cazul cînd Pămîntul ar fi în repaus,

[1] Și a lui Michelson, din 1881.

imobil în spațiu. Diferența dintre acești doi timpi, $t_l > t_t$, este $\Delta t = t_l - t_t = \frac{2L}{c}(1 + \beta^2)) - \frac{2L}{c}\left(1 + \frac{1}{2}\beta^2\right) = \frac{L}{c}\beta^2$.

Acestei diferențe de timp îi corespunde o anumită diferență de fază și, ca urmare, fenomenul de interferență. În lunetă se observă un ansamblu de franje alternativ luminate și întunecate.

Pentru a feri interferometrul, foarte sensibil, de vibrații mecanice[1] sau de alte influențe, precum și pentru a-l roti ușor, acesta era montat pe un bloc de marmură cu grosimea de 35,6 cm și suprafața de 1,5 m², așezat pe un inel din lemn de stejar. Întregul ansamblu plutea pe mercur într-o baie confecționată din cărămizi (figura de interferență vibra chiar numai la prezența unei persoane în apropierea instalației, din cauza variației temperaturii).

Rotirea aparatului era impusă de faptul că brațele interferometrului nu erau riguros egale și nici nu puteau fi făcute absolut egale. De aceea, aparatul a fost rotit cu 90° în sens trigonometric astfel că brațul $IA_1$ a devenit transversal față de mișcarea de translație a Pământului, iar $IA_2$ paralel cu mișcarea de translație. Prin rotirea cu 90°, însă, diferența dintre lungimile brațelor, oricît de mică ar fi ea, devine fără importanță și, de aceea, nu-i rămîne experimentatorului decît să măsoare deplasarea figurii de interferență. Dar, rotind aparatul, sensul razelor de lumină, deci și al undelor luminoase (razele reprezintă direcțiile de propagare a undelor) față de „eter" se schimbă. Cum celelalte condiții și elemente rămîn neschimbate, urmează că în acest caz trebuie să se obțină un $\Delta t' = -\Delta t$, adică

$$\Delta t' = -\frac{L}{c}\beta^2.$$

Intervalul de timp corespunzător acestei rotiri este

$$\Delta\theta = \Delta t - \Delta t' = 2\frac{L}{c}\beta^2.$$

Dar, datorită rotirii aparatului, trebuia ca figura de interferență să se deplaseze în cîmpul lunetei. La un interval de timp egal cu o perioadă a vibrației luminoase, deplasarea

[1] În timpul experienței a fost oprită circulația vehiculelor prin oraș.



figurii de interferență ar fi fost egală cu lățimea unei franje. Înseamnă că în intervalul de timp $\Delta\theta$ trebuie ca figura de interferență să se deplaseze cu $x$ din lățimea unei franje. Deci

$$x = \frac{\Delta\theta}{T} = \frac{2L}{\lambda}\beta^2$$

sau

$$x = \frac{2L}{\lambda}\cdot\frac{v^2}{c^2}. \qquad (5)$$

În experiența Michelson-Morley, autorii au făcut ca lumina, pe cele două direcții rectangulare, să sufere mai multe reflexii și astfel lungimea $L$ a drumului parcurs de ea devenise de 11 metri pe fiecare din cele două brațe ale interferometrului. Cum ei au folosit radiația galbenă a sodiului a cărei lungime de undă este de circa $6{,}9 \cdot 10^{-5}$ cm și cum $v = 3 \cdot 10^4$ m/s, iar $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, din formula (5) se obține

$$x \approx 0{,}37.$$

Aceasta înseamnă că figura de interferență trebuia să se deplaseze cu ceva mai mult de o treime dintr-o franjă. Cum aparatul putea măsura cu precizie de o sutime dintr-o franjă, evident că această deplasare era perfect măsurabilă. Dar, stupoare! Deplasarea așteptată nu s-a observat. Aceasta însemna că cei doi timpi $t_l$ și $t_t$ aveau aceeași valoare și deci nu exista vreo întîrziere între cele două unde luminoase. Au fost făcute cîteva mii de observații, la diverse altitudini, pe crestele munților, în balcoane, în toate anotimpurile anului, dar rezultatul a fost de fiecare dată același, adică nu s-a produs nici o deplasare a figurii de interferență. Această constatare a fost denumită *rezultatul negativ* al experienței Michelson-Morley. Rezultatul acestei experiențe a fost caracterizat de cunoscutul filozof englez John Bernal ca „cel mai însemnat rezultat negativ din istoria științelor naturii". Într-adevăr, experiențele ulterioare au confirmat aceasta.

Albert Abraham *Michelson* (1852—1931), fizician american, a fost profesor la Universitatea din Chicago. Are contribuții de valoare în fizică. Astfel, a construit un interferometru sensibil, care-i poartă numele. Acest interferometru a fost folosit în scopul punerii în evidență a mișcării absolute. Rezultatul acestor expe-

rienţe a contribuit la fundamentarea experimentală a teoriei relativităţii restrînse.

Michelson a folosit metodele interferometrice pentru măsurarea metrului etalon şi pentru măsurarea vitezei luminii, pentru studiul structurii hiperfine a spectrelor şi în astronomie. În anul 1907 a primit Premiul Nobel pentru fizică, pentru lucrarea: „Invenţia interferometrului şi studii spectroscopice şi metrologice". Viteza luminii a măsurat-o în anii 1926 şi 1931.

Primul rezultat negativ a fost publicat de Michelson în revista „American Journal of Science", într-un articol intitulat „Mişcarea relativă a Pămîntului şi eterul luminos". Următorul rezultat negativ a fost făcut cunoscut lumii ştiinţifice prin intermediul aceleiaşi reviste, în anul 1887, în care Michelson publică lucrarea ce purta următorul titlu: „Despre mişcarea relativă a Pămîntului şi eterul propagator de lumină". Această lucrare a fost publicată în acelaşi an şi în revista engleză „Philosophical Magazine".

Michelson a fost atît de dezamăgit de rezultatul negativ al experienţei pe care a făcut-o, încît — pentru a se consola — scria: „Cred că se va recunoaşte că problema care a dus la inventarea interferometrului compensează din plin faptul că această experienţă meticuloasă a dat un rezultat negativ". Cu alte cuvinte, a atras atenţia posterităţii asupra inventării interferometrului, care astăzi îi poartă numele pe bună dreptate. Michelson a fost dezamăgit deoarece i se spulberase speranţa că va fi primul care va dovedi experimental existenţa „vîntului de eter" de la suprafaţa Pămîntului, prin măsurarea deplasării figurii de interferenţă, deplasare care trebuia să fie, aşa cum am arătat mai sus, de 0,37 dintr-o franjă. Rezultatul experienţelor[1] fiind negativ, însemna că nu există nici o diferenţă de timp $\Delta t$ sau $\Delta t'$ şi deci viteza Pămîntului prin „eter" nu putea fi calculată. Într-adevăr, din relaţia (5), rezultă că, $x$ fiind egal cu zero (deoarece nu s-a putut măsura nici cea mai mică deplasare a figurii de interferenţă), iar celelalte mărimi $L$, $c$, $\lambda$ diferite de zero, $v$ ca viteză absolută trebuie să fie zero şi deci mişcarea Pămîntului nu este absolută faţă de „eterul", considerat imobil, ci este relativă, cu viteza de 30 km/s.

Rezultatul negativ al acestor experienţe, de importanţă capitală pentru fizica acelei vremi, a suscitat printre fizicieni ample discuţii, devenite pasionante, în ele fiind antre-

[1] Michelson (1881) şi Michelson-Morley (1887).



naţi şi matematicieni de frunte, ca Henri Poincaré (1854—1912)[1].

Experienţa efectuată de către Michelson şi Morley a condus la concluzia că ori eterul este complet antrenat de Pămîntul în mişcare, ori concepţia despre „eter" ca mediu imobil era incorectă. Prima parte a acestei concluzii a trebuit să fie abandonată, deoarece experienţa lui Fizeau a demonstrat că eterul nu este antrenat de atmosfera Pămîntului. Admiterea existenţei „eterului" venea, însă, în contradicţie cu fenomenul numit *aberaţie stelară*. Fenomenul constă în variaţia poziţiei aparente a stelelor pe bolta cerească, observate dintr-un punct de pe suprafaţa Pămîntului, datorită mişcării atît a observatorului în sine cît şi, evident, a acestuia împreună cu Pămîntul în jurul Soarelui, precum şi datorită vitezei finite de propagare a luminii. Din cauza respectivului fenomen, axa unei lunete cu care se observă o stea nu coincide cu direcţia observator-stea vizată, ci face un unghi (numit *unghi de aberaţie)*, care exprimă mărimea aberaţiei stelare[2]. În anul 1871, astronomul englez Airy a întreprins o serie de măsurători ale aberaţiei stelare cu o lunetă normală şi cu o lunetă umplută cu apă. În urma acestor cercetări a ajuns la concluzia că „eterul" este parţial antrenat de un mediu în mişcare în care se găseşte „eter"; în cazul experienţei sale, mediul era apa, ca şi în experienţa lui Fizeau (1851). Acest rezultat ar fi constituit o confirmare a teoriei „eterului" dată de Fresnel în anul 1818, dacă rezultatul experienţei Michelson-Morley n-ar fi fost în contradicţie cu rezultatele cercetărilor lui Airy. Aşadar, păstrîndu-se ipoteza existenţei „eterului", nu se putea explica în acelaşi timp rezultatul negativ Michelson-Morley, rezultatul experienţei lui Fizeau şi fenomenul aberaţiei stelare, decît numai admiţînd că „eterul" are anumite proprietăţi pentru explicarea rezultatului negativ al lui Michelson şi Morley şi proprietăţi diametral opuse pentru a explica celelalte rezultate (ale lui Fizeau şi Airy). Desigur, nici un mediu nu ar putea avea astfel de proprietăţi, deci nici prezumtivul eter. Pentru a salva, totuşi, ipoteza existenţei „eterului" şi a

[1] Poincaré a presupus că există o lege a naturii care nu îngăduie să se descopere „vîntul de eter" prin nici un fel de experienţe, cu alte cuvinte, nu există nici o posibilitate de a se determina viteza absolută a unui corp.

[2] Aberaţia stelară a fost descoperită de către J. Bradley în anul 1728.

explica rezultatul negativ al experienței Michelson-Morley, W. Ritz a emis o ipoteză, care nu a fost însă confirmată de experiență: el a presupus că viteza luminii în „eter" ar depinde de viteza sursei de lumină și că pentru o sursă mobilă viteza luminii este egală cu suma geometrică dintre viteza luminii cînd sursa este în repaus și viteza sursei (ipoteza balistică)[1]. Ipoteza lui Ritz era în contradicție cu efectul Doppler și cu observațiile privind stelele duble (sisteme stelare alcătuite din două stele, una rotindu-se în jurul celeilalte, ambele evoluînd în jurul unui centru de masă comun), care sînt foarte îndepărtate și au fost descoperite cu ajutorul efectului Doppler.

Au fost emise și alte ipoteze, în legătură cu rezultatul negativ al experienței Michelson-Morley, dar cea mai îndrăzneață, mai revoluționară, a fost aceea a lui Fitzgerald (1883) și Lorentz (1892), independent unul de altul. Lorentz a dat și o dezvoltare matematică. Ipoteza Lorentz-Fitzgerald explica rezultatul negativ al experienței Michelson-Morley, dar nu a fost confirmată de practică și, de aceea, a fost abandonată. Totuși, în puține cuvinte, merită să o expunem aici. Pentru aceasta să considerăm formulele (3) și (4) și pe care să le scriem sub forma

$$t_l = \frac{2L}{c} \cdot \frac{1}{k^2} \qquad (6)$$

și

$$t_t = \frac{2L}{c} \cdot \frac{1}{k}.$$

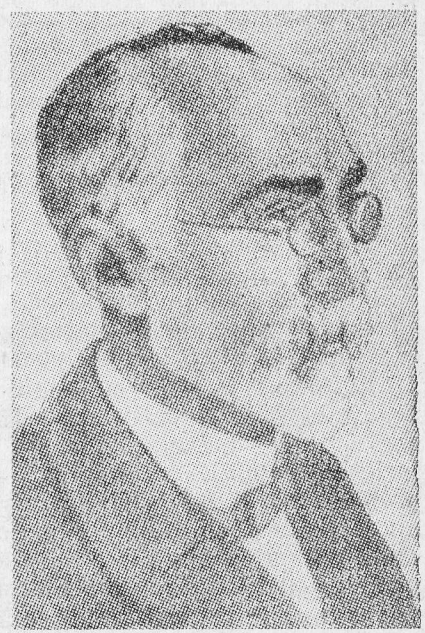
Faptul că nu s-a observat deplasarea figurii de interferență la rotirea interferometrului cu 90° în experiența Michelson-Morley, conduce la $\Delta t' = 0$, ceea ce înseamnă că $t_l$ ar trebui să fie egal cu $t_t$. Lorentz și Fitzgerald au arătat că pentru ca $t_l$ să fie egal cu $t_t$ ar trebui ca în formula (6) să punem $kL$ în loc de $L$. Cum $k < 1$ rezultă că brațul longitudinal al interferometrului (brațul paralel cu mișcarea de translație a Pămîntului) ar fi mai scurt decît brațul transversal, a cărui lungime este $L$. Lorentz și Fitzgerald au demonstrat că în timpul experienței brațul

[1] Vezi *Optica* de G.S. Landsberg, Editura tehnică, București, 1958, p. 334 și *Optica* de G. Brătescu, Editura didactică și pedagogică, București, 1965, p. 273.



se contractă spontan și au stabilit o lege, care se formulează astfel: *orice corp în mișcare rectilinie, cu o viteză* v, *față de un SR imobil, se contractă pe direcția mișcării proporțional cu factorul* k, *dimensiunile sale transversale rămînînd neschimbate; fenomenul nu depinde de natura corpului în mișcare.* Contracția pe care o suferă corpul a fost numită *contracție Lorentz-Fitzgerald*, iar *k factor de contracție Lorentz-Fitzgerald.*

Hendrik Antoon *Lorentz* (1853—1928), fizician olandez, a fost profesor la Universitatea din Leiden[1]. A pus bazele teoriei electronice a materiei, teorie care a permis să se explice numeroase fenomene ca: dispersia luminii, efectul Zeeman ș.a. Această teorie reprezintă ultima etapă de dezvoltare a fizicii clasice. Lorentz a mers mai departe, depășind limitele clasicismului în fizică și a contribuit la elaborarea electrodinamicii mediilor în mișcare, a dat formulele de transformare, care-i poartă numele, pe care Einstein le-a interpretat punîndu-le la baza teoriei relativității restrînse. În anul 1902 a primit Premiul Nobel pentru fizică, pentru lucrarea „Teoria efectului Zeeman".



**Hendric Antoon Lorentz**

[1] Azi Leyda.

Cu toate că ipoteza contracției lămurea perfect rezultatul negativ al experiențelor lui Michelson și Michelson-Morley, unii oameni de știință au avut rezerve. Pe bună dreptate aceștia au întrebat: din ce cauză se contractă? de ce nu s-a constatat inegalitatea brațelor interferometrului la începutul experiențelor? din ce cauză pînă la aceste celebre experiențe nu a fost observat fenomenul contracției? Autorii ipotezei contracției au dat următorul răspuns: în primul rînd, au spus ei, cînd un corp trece din stare de repaus în stare de mișcare, moleculele acestuia trec dintr-o stare de echilibru într-alta și poziția lor reciprocă se schimbă, ceea ce are ca rezultat reducerea dimensiunilor; nu s-a putut observa inegalitatea brațelor, deoarece în timpul măsurătorii brațului longitudinal s-a contractat, de asemenea, și instrumentul (metrul etalon, de pildă), proporțional cu factorul $k$. Din cauza fenomenului de compensare, evident că nu s-a putut constata inegalitatea brațelor. Această concluzie este valabilă indiferent de procedeul sau de instrumentul folosit. În al doilea rînd, efectul contracției nu a putut fi observat din cauză că este extrem de mic. Într-adevăr, dacă ne-am închipui că o bară de 10 km se mișcă cu $v =$ $= 8$ km/s paralel cu direcția de translație a Pămîntului, atunci contracția ar fi de 0,0035 mm. Așadar, cu toată viteza mare (prima viteză cosmică), contracția este neglijabilă: raza Pămîntului fiind de 6 370 km și viteza sa de translație de 30 km/s, contracția în acest caz ar fi de 63,7 mm; în comparație cu 6 370 000 000 mm este cu totul neglijabilă.

Totuși, oamenii de știință nu s-au declarat mulțumiți și au propus să se verifice fenomenul contracției în diverse situații, folosind diverse metode. Astfel, s-au folosit metode electrice, optice, dar fenomenul contracției nu a fost pus în evidență și astfel ipoteza contracției a fost abandonată.

În ultimă instanță s-a ajuns la concluzia că rezultatul negativ al experienței Michelson-Morley conduce la inexistența acelui „eter" universal care ar umple întregul univers, inclusiv corpurile transparente și deci nu se poate pune problema de a se evidenția mișcarea absolută. Așa fiind, nu se poate vorbi despre *mișcarea absolută* a corpurilor, ci numai despre *mișcarea relativă* a lor, adică numai despre mișcarea unui corp în raport cu alt corp sau, dacă doriți, a unui sistem de referință ($SR$) față de altul. De aceea, observatorul care ia parte la mișcarea aparatului va spune despre



observatorul situat într-un sistem de referință în spațiu că acesta se află în mișcare, în timp ce el este în repaus. Observatorul aflat în $SR$ din spațiu va spune despre celălalt la fel: că acesta este în mișcare, iar el se află în repaus. Prin urmare, *noțiunea de mișcare absolută este lipsită de sens și ca atare trebuie să se renunțe la ea.*

Studiind amănunțit și cu multă atenție modul cum s-a desfășurat experiența Michelson-Morley și analizînd critic toate faptele experimentale acumulate de știința fizicii pînă la el, Einstein, făcînd abstracție de mecanica clasică, a ajuns la următoarele concluzii, care au revoluționat fizica:

— pentru cei doi observatori, rezultatul experienței Michelson-Morley este același (am arătat mai sus că prin calcul se deduce acest lucru);

— pentru ambii observatori, cel de pe Pămînt care ia parte la mișcare o dată cu aparatul și cel aflat în $SR$ din spațiu, viteza luminii are aceeași valoare;

— durata fenomenului și lungimea brațului interferometrului care este paralel cu mișcarea de translație a Pămîntului ar putea fi diferită pentru cei doi observatori. Adică, pentru observatorul din $SR$ din spațiu lungimea brațului poate fi mai mică și durata desfășurării fenomenului mai mare, aceasta datorîndu-se, evident, stării de mișcare a unui sistem de referință față de celălalt referențial. Unii filozofi subiectiviști au interpretat eronat această afirmație a lui Einstein arătînd că Einstein însuși spune că „lungimea brațului aparatului și durata depind de observator", adică — spuneau ei — de un factor subiectiv (de observator). Or, nu aceasta reiese din afirmația lui Einstein. Cînd el spune că lungimea brațului interferometrului și durata fenomenului ar putea depinde de observator, se referă la faptul că acestea depind de starea de mișcare a $SR$ în care se află observatorul. De altfel, aceasta reiese și din cele expuse mai sus.

Ținînd seama de cele afirmate pînă aici, ne vom întoarce din nou la experiența Michelson-Morley. Deoarece $\Delta t = 0$, deci $t_l = t_t$, înseamnă că pentru a parcurge brațul transversal dus-întors lumina are nevoie de un timp $t_t = \frac{2L}{c}$ și de un timp egal pentru a-l parcurge pe cel longitudinal $t_l = \frac{2L}{c}$. Aceasta înseamnă că pentru observatorul ce ia

parte la mișcare odată cu aparatul durata experienței este $t_m = \frac{2L}{c}$.

Să vedem acum care este durata experienței pentru observatorul din *SR* fix din spațiu. Pentru acest observator, brațul longitudinal este mai scurt decît cel transversal, $L'$. Cum timpii de parcurgere a celor două brațe trebuie să fie egali ($t_l = t_t = t_f$) vom avea, conform cu relațiile (3) și (4),

$$t_l = \frac{2L'}{c} \cdot \frac{1}{1-\beta^2} \text{ și } t_t = \frac{2L}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

sau

$$t_f = \frac{2L'}{c} \cdot \frac{1}{1-\beta^2} = \frac{2L}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

De aici rezultă, după efectuarea calculelor

$$L' = kL, \tag{7}$$

unde $k = \sqrt{1-\beta^2}$. Se observă că s-a obținut contracția Lorentz-Fitzgerald. Să comparăm acum timpul în care se desfășoară experiența pentru observatorul din *SR* mobil ($t_m$) cu timpul în care decurge experiența pentru observatorul din *SR* fix ($t_f$). Vom avea

$$t_f = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} t_m. \tag{8}$$

De aici rezultă că durata experienței nu este aceeași pentru ambii observatori; ea este mai lungă pentru observatorul aflat în *SR* fix, deci pentru acesta experiența decurge mai încet decît pentru observatorul aflat în *SR* mobil, care participă la mișcare. Pentru observatorul din *SR* fix totul decurge ca și cum timpul s-ar dilata.

În concluzie, putem spune că observatorul din *SR* fix constată două fenomene neobișnuite: *contracția longitudinală* și *dilatarea timpului*. În acest fel Einstein a explicat frumos și elegant rezultatul negativ al experienței Michelson-Morley.

Se pune în mod firesc întrebarea: ce deosebire este între contracția Lorentz-Fitzgerald, care a fost abandonată și contracția Einstein, care a fost acceptată? După Lorentz și Fitzgerald, contracția trebuie să se manifeste atît pentru observatorul care nu ia parte la mișcarea *SRI* unde se află



interferometrul, cît și pentru observatorul care ia parte la mișcarea aparatului. Or, acest din urmă fapt a fost infirmat de experiență. După Einstein, contracția se manifestă numai pentru observatorul care nu ia parte la mișcarea *SRI* cu interferometrul, lucru confirmat de experiență. Și aceasta, datorită mișcării *SRI*, în care se află aparatul, față de sistemul său de referință.

Cu această pregătire preliminară, deși cam lungă, dar absolut necesară, vom putea înțelege subiectul propus.

## Principiile teoriei relativității restrînse

Am spus că această introducere era absolut necesară. De ce? Pentru a ne da seama de necesitatea istorică a apariției teoriei relativității restrînse, ceea ce este foarte important, deoarece mai sînt unii — puțini la număr — care mai cred că aceasta este o teorie fantezistă. Din cele expuse pînă aici ne-am putut da seama că experiențele Michelson-Morley au stîrnit în fizică o adevărată criză științifică. Or, teoria relativității restrînse a reușit să scoată fizica din impasul în care se găsea.

Teoria relativității restrînse a trebuit să facă față la numeroase confruntări experimentale, ieșind de fiecare dată învingătoare. De aici și marea încredere pe care o au oamenii de știință, fizicieni și nefizicieni, în această teorie.

Se poate spune că apariția teoriei relativității a fost determinată de marele număr de fapte experimentale și lucrări teoretice anterioare ei, din care o parte au fost întîlnite în succinta trecere în revistă prezentată mai sus; nu lipsea decît o sinteză genială, care să rezolve problemele ce au condus la criza în fizică, într-un mod revoluționar, sinteză pe care a realizat-o Albert Einstein. El a studiat întregul material faptic acumulat pînă la vremea sa, ajungînd la concluzia că noțiunile de spațiu absolut și timp absolut din mecanica lui Newton și, odată cu acestea, întreaga mecanică newtoniană trebuie revizuite. Totuși, Einstein a creat teoria relativității restrînse fără a face vreo ipoteză asupra spațiului și timpului, punînd la baza ei următoarele două principii: *principiul relativității* și *principiul constanței vitezei luminii*.

*Principiul relativității* spune că *orice lege fizică este identică în toate sistemele de referință care se mișcă rectiliniu*

*și uniform unul față de altul.* Așadar, în toate sistemele de referință inerțiale legile fizicii sînt aceleași[1]; definiția *SRI* din mecanica clasică rămîne valabilă și aici. Dacă ne amintim bine principiul relativității enunțat de Galilei (legile mecanicii sînt aceleași în toate *SRI*)[2], constatăm că Einstein, prin primul principiu, nu a făcut decît să extindă principiul relativității din mecanica newtoniană la toate fenomenele fizice. Prin urmare, primul principiu einsteinian este în deplină concordanță cu mecanica clasică, reprezentînd o generalizare a principiului relativității galileene.

Acest principiu einsteinian are o consecință imediată și anume: deoarece legile fizicii sînt aceleași în orice sistem de referință inerțial, înseamnă că starea unui astfel de sistem de referință — starea de repaus sau de mișcare rectilinie uniformă — nu poate fi pusă în evidență prin nici o experiență internă, de orice natură ar fi ea.

Conform primului principiu einsteinian, un fenomen fizic, în condiții identice, se desfășoară în mod identic în orice *SRI*. Că este adevărat, ne putem convinge foarte ușor. Pentru aceasta să ne imaginăm unele experiențe efectuate pe sol și repetate într-un vagon de tren în mișcare, cu viteză constantă și anume să studiem, de exemplu, în vagonul în mișcare, căderea liberă a corpurilor. Vom observa că un corp lăsat liber cade după o direcție verticală, paralelă cu a firului cu plumb, că legile căderii se pot studia la fel ca și pe sol, forma lor fiind identică cu a legilor stabilite pe sol. Putem da și alte exemple:

Să presupunem că în același vagon determinăm temperatura de fierbere a apei. La presiunea normală, punctul de fierbere va fi tot 100°C ca și pe sol.

Dacă măsurăm rezistența electrică a unui fir conductor printr-o anumită metodă, pe sol, și apoi în vagonul în mișcare cu $v = \text{const.}$, în aceleași condiții, valoarea rezistenței va fi aceeași.

Seria exemplelor ar putea continua. Ne dăm seama că totul s-ar complica enorm dacă desfășurarea fenomenelor nu s-ar face conform acestui principiu einsteinian. De exemplu, legile căderii ar putea avea altă formă în vagonul în mișcare, față de cele stabilite pe sol; apa, în vagonul

[1] Aceasta trebuie înțeles în sensul că legile se exprimă prin același sistem de ecuații în toate *SRI*.

[2] Vezi și p. 18. Aici se dă o formulare echivalentă.



respectiv, ar putea fierbe la altă temperatură, bricheta sau chibriturile s-ar putea să nu se aprindă, rezistența electrică a conductorului considerat să aibă altă valoare și multe altele!

Se poate conchide că principiul relativității einsteiniene este în acord cu mecanica newtoniană în ceea ce privește independența legilor fizicii față de mișcările de translație uniforme.

*Principiul constanței vitezei luminii* postulează faptul că *în vid, viteza luminii este aceeași în toate sistemele de referință inerțiale.* Ca să înțelegem ce înseamnă această formulare să presupunem că într-un *SRI* viteza luminii este $c$ și că vrem să știm care este viteza luminii față de un alt *SRI*, care se mișcă față de primul sistem cu viteza $v$, după direcția și sensul razei de lumină. După mecanica newtoniană, viteza luminii față de cel de-al doilea *SRI* trebuie să fie

$$u_r = c - v,$$

iar dacă sensul de mișcare al celui de al doilea *SRI* ar fi contrar sensului de propagare a razei de lumină, atunci viteza luminii față de cel de al doilea *SRI* va fi

$$u_r = c + v.$$

În mod concret, luînd $c = 300\,000$ km/s și presupunînd că $v = 100\,000$ km/s, în primul caz ar trebui să avem $u_r = 200\,000$ km/s, iar în cel de-al doilea $u_r = 400\,000$ km/s. După cel de-al doilea principiu einsteinian, viteza luminii față de al doilea *SRI* trebuie să fie tot $c$ ($= 300\,000$ km/s). Ne întrebăm, este posibil oare ca $c - v = c + v = c$? Evident că nu! Aceasta înseamnă că în teoria relativității însumarea vitezelor se face în cu totul alt mod decît în mecanica clasică, așa cum se va vedea mai departe[1]. Deocamdată putem spune că cel de-al doilea principiu einsteinian este în total dezacord cu mecanica newtoniană. Dar acest principiu explică perfect rezultatul negativ al experienței Michelson-Morley. Viteza luminii fiind aceeași în orice *SRI*, înseamnă că cei doi timpi $t_l$ și $t_t$ sînt egali, deoarece lumina parcurge drumuri egale cu aceeași viteză.

Contradicția dintre cel de-al doilea principiu einsteinian și mecanica newtoniană a fost rezolvată de cel mai bun judecător al oricărei teorii: experiența. Într-adevăr, obser-

[1] Vezi p. 165 din prezentul volum.

vațiile foarte precise făcute de către Sitter asupra stelelor duble, prin măsurători fotometrice de foarte mare exactitate efectuate asupra luminii emise de către acestea, au arătat că *viteza luminii este independentă de viteza sursei emițătoare*, adică viteza luminii este aceeași, deci constantă.

Al doilea principiu al teoriei relativității restrînse implică noțiunea de *timp relativ* și aceasta a produs multă uimire printre oamenii de știință. Iată, de pildă, ce scria în 1921 astronomul Charles Nordmann de la Observatorul astronomic din Paris, în cartea sa *Einstein et l'Univers*, p. 241 (Editura Hachette): „Cum se poate închipui că propagarea unei aceleiași raze de lumină este identică pentru un observator care fuge din fața ei, ca și pentru altul care vine în întîmpinarea ei? Dacă aceasta este cu putință, în orice caz este absolut de neînchipuit cu mentalitatea noastră ancestrală și nu putem să ne închipuim, oricîte sforțări am face, mecanismul, natura acestei propagări".

Este adevărat că nu au fost realizate încă, pînă în prezent, experiențe care să verifice direct principiul al doilea al lui Einstein. El însă a fost unanim acceptat datorită succeselor de necontestat pe care le-a înregistrat teoria relativității restrînse.

Nu putem să nu menționăm aici o confuzie regretabilă, care s-a făcut și se face adeseori. Cu toții cunoaștem expresia: „totul în lume este relativ". Aceasta a condus la o confuzie gravă între teoria relativității și relativismul filozofic. Mulți filozofi afirmau că Einstein nu a descoperit mare lucru, că i se atribuie mai multe merite decît le are, deoarece în fond el n-a făcut altceva decît a exprimat în limbaj matematic expresia de mai sus. Oare așa să fie? Dacă ne-am lua după expresia „totul este relativ" ar însemna că toate cunoștințele noastre sînt relative. Or, nu aceasta arată principiul relativității, ci el se referă la faptul că mișcările sînt relative, că mișcarea unui corp trebuie considerată în raport cu alt corp în mișcare, că legile fizicii nu depind de un factor subiectiv al observatorului, de persoana acestuia, ci de *SRI*. Așadar, teoria relativității nu are nimic comun cu expresia de mai sus. Denumirea de „teoria relativității" se datorește faptului că ea studiază fenomene care au loc în sisteme de referință mobile, iar afirmația că legile fizicii sînt independente de mișcarea *SRI* constituie un element absolut, invariabil, al teoriei relativității.



## PRINCIPIILE TEORIEI GENERALE A RELATIVITĂȚII

Așa cum am văzut, teoria relativității restrînse lucrează numai cu sisteme de referință inerțiale (*SRI*), denumite și sisteme de referință galileene. Și, fiindcă în teoria relativității restrînse nu se spune nimic despre sistemele de referință neinerțiale, este firesc să ne întrebăm: oare concluziile teoriei relativității restrînse pot rămîne valabile și în astfel de referențiale?

De asemenea, în teoria relativității restrînse nu se amintește nimic despre forțele centrifuge de inerție, cu toate că ele se manifestă în natură, și nici despre forța gravifică. Or, gravitația terestră este un fenomen foarte important și reprezintă un caz particular al gravitației universale. Așadar, teoria relativității restrînse prezenta unele neajunsuri, ce trebuiau să fie neapărat eliminate.

După publicarea teoriei relativității restrînse, în anul 1905, Einstein și-a dat seama de aceste lipsuri și a început să mediteze asupra problemelor, elaborînd, după mulți ani de muncă intensă, *teoria generală a relativității* (în anul 1916). Einstein face următoarele observații:

— oriunde în Univers există un cîmp gravitațional, există și un cîmp de accelerații;

— un univers cu gravitație nu poate asculta de geometria euclidiană și, ca urmare, este un univers neeuclidian.

Rezultă de aici că relativitatea restrînsă este o teorie riguros valabilă în aproximația masei neglijabile și în cazurile în care gravitația are un rol neesențial (cum este, de exemplu, mișcarea particulelor elementare într-un cîmp electric sau magnetic).

În toate celelalte cazuri, gravitația are un rol însemnat și deci nu se poate face abstracție de ea în nici o teorie. Așa se explică faptul că Einstein a lucrat mai mulți ani la generalizarea teoriei relativității — *teoria generală a relativității*, la baza căreia pune trei principii: *principiul relativității generalizate*, *principiul non-inerției* și *principiul echivalenței*.

Și fiindcă studiul teoriei generale a relativității reclamă cunoștințe de matematică complicate, cum ar fi calculul tensorial, vom aborda aici doar enunțurile principiilor menționate, încercînd să dăm explicarea lor intuitivă.

*Principiul relativității generalizate* se referă la faptul că *legile fenomenelor fizice păstrează aceeași formă în toate sistemele de referință*. Din acest enunț rezultă că Einstein a extins principiul relativității din mecanica clasică și din teoria relativității restrînse asupra tuturor sistemelor de referință, fie ele inerțiale, fie neinerțiale. Dar, așa cum știm, sistemele inerțiale sînt sisteme de referință antrenate într-o mișcare de translație cu viteză constantă, în ele fiind valabilă legea inerției și, prin extensie, legile mecanicii lui Newton. Într-un astfel de referențial, un corp destul de depărtat de toate celelalte corpuri, deci izolat, nu se poate afla decît într-una din următoarele două situații: în repaus sau în mișcare rectilinie cu viteză constantă. Spunem aceasta deoarece, conform legii inerției, într-un referențial inerțial, impulsul unui corp izolat este tot timpul constant.

Legea inerției nu-și păstrează, însă, valabilitatea în sistemele de referință aflate în mișcare de translație neuniformă sau în mișcare de rotație, adică în referențialele neinerțiale. În astfel de referențiale un corp izolat nu se poate găsi decît în mișcare variată, deoarece impulsul lui variază întotdeauna în decursul timpului.

În astfel de referențiale neinerțiale este valabil cel *de-al doilea principiu al relativității generalizate: într-un sistem de referință neinerțial, impulsul oricărui corp, destul de depărtat de toate celelalte corpuri, este variabil în timp*. Analizînd acest enunț, ne dăm seama imediat că un astfel de corp nu poate avea decît o mișcare variată. Deci el nu se poate găsi în repaus sau în mișcare rectilinie uniformă. Dar, așa cum se știe, în sistemele de referință accelerate apar forțele de inerție[1] cu ajutorul cărora observatorul aflat într-un astfel de sistem[2] pune în evidență starea referențialului său[3]. Ținînd seama și de cele arătate cu privire la sistemele de referință inerțiale, putem enunța următoarele:

1°. Într-un referențial inerțial este valabilă *legea (principiul) inerției*, în timp ce într-un referențial neinerțial este valabil *principiul non-inerției*. În primul sistem de referință, un corp izolat poate să se afle fie în mișcare rectilinie, cu viteză constantă, fie în repaus, în timp ce în cel

[1] Denumite și pseudoforțe sau forțe complementare.
[2] Deci izolat de exterior.
[3] Recomandăm cititorilor lucrarea *Bazele fizice ale relativității einsteiniene* de N. Bărbulescu, Editura științifică și enciclopedică, București, 1975, p. 163–181.



de-al doilea referențial un corp izolat nu se poate găsi decît în mișcare variată, deoarece impulsul său este variabil tot timpul.

2°. În *SRI* un corp poate căpăta o mișcare variată numai dacă asupra lui acționează o forță, în timp ce în sistemele de referință neinerțiale o astfel de mișcare variată o poate avea orice corp, fără ca asupra lui să se exercite forțe.

Se demonstrează că într-un sistem de referință neinerțial aflat în mișcare de translație, ecuația mișcării unui corp este identică cu ecuația mișcării aceluiași corp într-un referențial inerțial. Aceasta înseamnă că dinamica sistemelor de referință neinerțiale se poate reduce la dinamica sistemelor de referință inerțiale; se impune însă o condiție și anume, în referențialele neinerțiale să se ia în considerare și forțele de inerție (pseudoforțele). În aceste condiții, legea care guvernează mișcarea variată a unui corp într-un referențial neinerțial devine identică cu legea care guvernează mișcarea variată a aceluiași corp într-un *SRI*. Așa fiind, înseamnă că un sistem de referință neinerțial se comportă ca un referențial inerțial. Aceasta ne conduce la concluzia că generalizarea principiului relativității este îndreptățită.

*Principiul echivalenței* spune că *un sistem de referință accelerat fără gravitație este echivalent cu un referențial galileean (SRI) cu gravitație* (Pămîntul, în primă aproximație). Desigur, din această formulare nu înțelegem imediat mare lucru. S-o explicăm!

Ne amintim experiența asupra căderii libere făcută de Newton cu un tub vidat. Ea demonstrează că, în aceleași condiții, accelerația căderii libere a corpurilor este aceeași pentru toate corpurile, indiferent de substanța din care sînt alcătuite. Toate corpurile, grele sau ușoare, cad în vid cu aceeași viteză și deci accelerația este independentă de masa acestora. Faptul, de acum familiar, este extraordinar de important; el reprezintă o proprietate remarcabilă a cîmpului gravitațional, proprietate care nu se constată la alte cîmpuri, cum ar fi cîmpul electric, ori cel magnetic, în care particule încărcate cu sarcini electrice diferite capătă accelerații diferite. *Putem spune că cîmpul gravitațional se manifestă ca un cîmp de accelerații.*

Să ne imaginăm o rachetă cosmică aflată în mișcare cu viteză constantă, destul de depărtată de orice aștri, astfel ca în ea să nu se facă simțită acțiunea gravitațională a

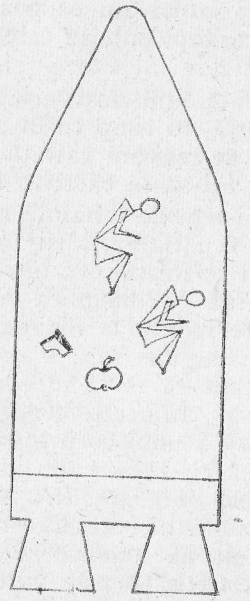


Fig. 4. Pentru ilustrarea stării de imponderabilitate.

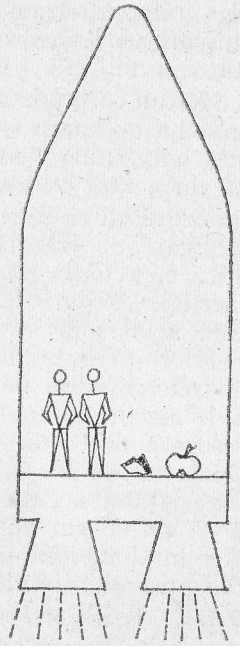


Fig. 5. Echivalența dintre un cîmp de accelerație și un cîmp gravitațional.

vreunuia (fig. 4). În aceste condiții, obiectele și astronauții din interiorul ei se vor găsi în stare de imponderabilitate, adică vor pluti liber (se neglijează atracția exercitată de elementele rachetei, unele asupra altora). Să presupunem acum că respectivii astronauți pornesc motoarele rachetei. Viteza acesteia va crește treptat în timp, adică racheta se va mișca accelerat. Dacă această accelerație va deveni egală cu 9,81 m/s², atunci oamenii și obiectele vor tinde să se deplaseze spre peretele vecin cu motoarele rachetei, care va deveni „podea" și, bineînțeles, peretele opus va deveni „plafon" (fig. 5). Astronauții vor ajunge astfel în picioare pe „podea" și se vor simți ca pe Pămînt. În realitate, ei și obiectele își mențin poziția inițială, iar podeaua înaintează spre ei ca urmare a accelerării rachetei. Dacă vor studia anumite fenomene în rachetă, accelerată cu $a = 9{,}81$ m/s²,



fenomene pe care în prealabil le-au studiat pe Pămînt, nu vor constata nici o deosebire. Ele se vor desfășura la fel. De aici decurge echivalența dintre un sistem de referință accelerat fără gravitație (în cazul nostru racheta) și un sistem de referință galileean (*SRI*), formulată ca principiu în teoria generală a relativității de însuși creatorul ei.

În sisteme de referință accelerate totul are loc ca și cum ar fi apărut un cîmp de forțe care acționează asupra particulelor, corpurilor, imprimîndu-le o accelerație. Acest cîmp de forțe ce apare în sisteme de referințe neinerțiale se numește *cîmp inerțial*.

Potrivit legii a II-a a dinamicii, atunci cînd asupra unui corp cu masa $m_i$ acționează o forță $\vec{F}$, corpul capătă o accelerație direct proporțională cu forța, avînd același sens și aceeași direcție cu a forței. Relația matematică este

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m_i},$$

în care $m_i$ măsoară inerția corpurilor și, de aceea, se numește *masă inerțială* (sau *inertă*).

De asemenea, știm că forța de atracție reciprocă dintre două corpuri, deci și dintre un corp și Pămînt, este dată de

$$F_a = k\frac{m_g M_g}{R^2}.$$

Aici $m_g$ și $M_g$ sînt mase gravitaționale (gravifice). Dar masa gravitațională a unui corp se poate defini prin relația cunoscută

$$G = m_g g$$

de unde

$$m_g = \frac{G}{g}.$$

Rezultă că un același corp are o masă inerțială și o masă gravifică! Prin experiențe foarte precise s-a dovedit că cele două mase sînt egale și deci că *un cîmp gravitațional echivalează cu un cîmp inerțial* (pentru fenomene mecanice), așa cum s-a arătat mai sus. Echivalența dintre cele două cîmpuri dovedește că fenomenele mecanice se desfășoară

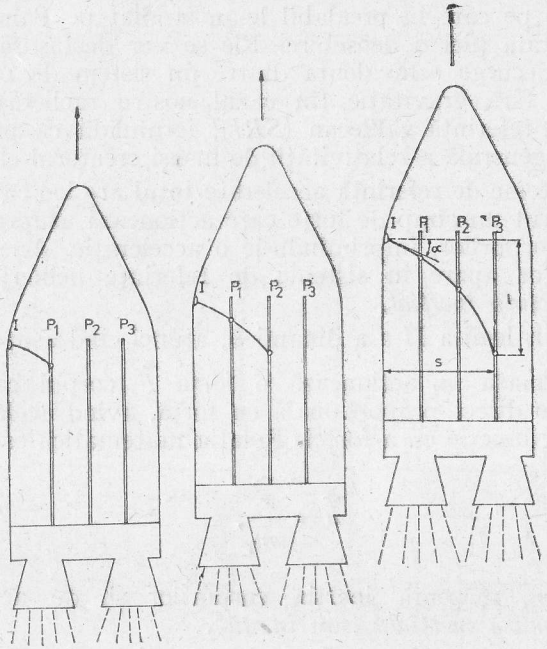



Fig. 6. Efectul curbării razei de lumină.

la fel în cele două cîmpuri, cu condiția ca ele să aibă aceeași intensitate.

Echivalența dintre un cîmp gravitațional și un cîmp inerțial se extinde la toate fenomenele fizice. Să ilustrăm cele afirmate printr-un exemplu. Pentru aceasta, să ne imaginăm aceeași rachetă cosmică în mișcare accelerată și un sistem de mai multe plăci fluorescente (fig. 6) și o sursă de lumină $I$ situate în interiorul ei. În locul unde ajunge lumina pe fiecare placă se produce o mică pată fluorescentă. Toate aceste pete se vor găsi pe o parabolă (pe figură este desenată exagerat pentru a reieși mai bine forma) curbată în jos. Unghiul $\alpha$ de deviere a razei de lumină este relativ mic și se obține din $\operatorname{tg} \alpha \approx \frac{l}{s}$, în care $s$ este distanța parcursă de lumină de la sursa luminoasă pînă la ultimul ecran, iar $l$ drumul străbătut de rachetă în mișcare uniform accelerată în același interval de timp.



Deci

$$s = ct \text{ și } l = \frac{1}{2} at^2 \qquad \text{(a)}$$

iar

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{2} a \cdot \frac{t}{c} = \frac{1}{2} a \cdot \frac{s}{c^2};$$

pentru $s = 10$ m, $a = g \approx 10$ m/s², $\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{18} \cdot 10^{-14}$ radiani și corespunde la un unghi de $10^{-16}$ secunde de arc, unghi sub care un obiect de 1 mm este văzut de la o distanță de 10 miliarde de kilometri! Din ecuațiile (a) rezultă, rezolvînd în raport cu $t$, ecuația traiectoriei

$$s^2 = 2 \frac{c^2}{a} l, \qquad \text{(b)}$$

care este o parabolă. Astronauții vor considera că fenomenul se produce datorită cîmpului inerțial din rachetă și vor conchide că atunci cînd o rază de lumină se propagă și într-un cîmp gravitațional, ea este curbată (în baza principiului echivalenței).

Acest efect nu a fost cunoscut pînă la Einstein[1], deși se știe că matematicianul german J. Solder a arătat, în 1801, într-o lucrare a sa (care a fost neluată în seamă) existența posibilă a acestui efect (curbarea razei de lumină în cîmp gravitațional). Einstein a conchis că dacă principiul echivalenței este un principiu general al fizicii, atunci efectul curbării razelor de lumină trebuie să se observe în natură. De exemplu, spunea el, razele de lumină care trec prin apropierea Soarelui, venind de la astre, trebuie să se curbeze în drumul lor spre un observator terestru.

În anul 1919 s-a confirmat pe deplin concluzia lui Einstein. În acel an a avut loc o eclipsă de Soare, văzută ca eclipsă totală în Africa. Evenimentul a fost studiat de o expediție britanică în Africa, care a observat o deplasare radială a pozițiilor aparente ale stelelor din apropierea

[1] Totuși B.G. Kuznețov afirmă, în cartea sa *Albert Einstein* (tradusă din l. rusă la Editura științifică, București, 1968, p. 262) că Newton și-ar fi pus următoarea întrebare: „Oare corpurile nu acționează la distanță asupra luminii și nu încurbează prin acțiunea lor razele de lumină?"

Soarelui, ceea ce a reprezentat o confirmare a principiului echivalenței dintre cîmpul gravitațional și cel inerțial.

În concluzie la cele spuse pînă aici, *teoria relativității restrînse studiază legile fizice în referențialele galileene, fără gravitație*, iar *teoria generală a relativității studiază legile fenomenelor fizice în sistemele de referință cu gravitație*, sau, ceea ce este același lucru, *în sistemele de referință neinerțiale*. Conform principiului echivalenței, *legile fenomenelor fizice se exprimă în aceeași manieră, oricare ar fi referențialul ales, cu condiția să ținem seama de gravitație*. În acest fel, accelerația, ca și spațiul și timpul, și-a pierdut caracterul absolut, deoarece un sistem de referință accelerat poate fi înlocuit cu un referențial neaccelerat, dar cu gravitație.

Ținînd seama de cele de mai sus, *principiul echivalenței*, cum l-a numit Einstein, se poate formula astfel: *cîmpul gravitațional este echivalent cu cîmpul inerțial, pentru toate fenomenele fizice*. Dar, adăuga Einstein, *această echivalență are un caracter local*.

Să mai analizăm puțin principiul echivalenței. În primul rînd, rezultă că accelerația gravitațională și accelerația datorită unei forțe sînt echivalente între ele și, ca atare, efectele fizice produse de ele sînt aceleași. În al doilea rînd, Einstein a precizat caracterul local al principiului, datorită faptului că, în timp ce cîmpul inerțial este întotdeauna uniform, cîmpul gravitațional este uniform numai pe porțiuni foarte mici. În figura 7 se arată liniile de cîmp ale Pămîntului. Se observă că numai pe porțiuni foarte mici

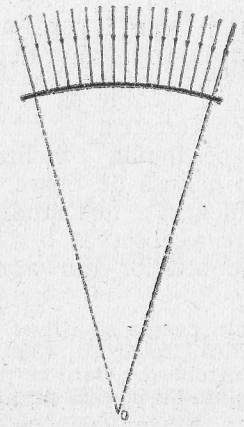


Fig. 7. Cîmpul gravitațional terestru.



liniile pot fi considerate paralele între ele, adică sînt paralele într-o regiune redusă a spațiului. Așadar, echivalența dintre cele două cîmpuri este numai locală, așa cum a precizat Einstein. Nu putem dezvolta mai mult acest subiect, deoarece el presupune cunoștințe matematice care depășesc nivelul cărții de față.

## PRINCIPIILE TERMODINAMICII

Fenomenul de difuzie și mișcarea browniană pun în evidență, incontestabil, existența agitației termice, adică a mișcării continue, permanente, a particulelor (atomi, ioni, molecule) care intră în componența corpurilor, indiferent de starea lor de agregare (solidă, lichidă sau gazoasă). Această mișcare este complet dezordonată și nu încetează decît la temperatura de zero absolut (0K = 273,15°C), temperatură ce nu a fost atinsă, încă, pînă în prezent. Este drept că s-a ajuns foarte „aproape" de 0K($\sim 10^{-5}$K), dar aceasta nu reprezintă chiar zero absolut. Agitația termică este o mișcare naturală, spontană, a particulelor și dovedește că materia și mișcarea sînt inseparabile.

Particulele ce alcătuiesc corpurile (sistemele fizice[1]) au mișcări de translație, de rotație, de vibrație și între ele se exercită interacțiuni. Fiecărui tip de mișcare îi corespunde o anumită formă de energie. De exemplu, în mișcare de translație particulele au *energie cinetică*, iar în mișcare de rotație, respectiv de vibrație, au *energie de rotație*, respectiv, *de vibrație*. În fine, totalitatea forțelor de interacțiune determină *energia potențială* a particulelor. Energia cinetică totală a particulelor ce intră în componența sistemelor fizice determină temperatura acestora (a sistemelor). Altfel spus, temperatura unui sistem reprezintă manifestarea macroscopică a energiei cinetice globale a particulelor sistemului.

*Energia totală* — formată din energiile cinetică, potențială, de rotație, de vibrație a unui sistem fizic reprezintă

[1] O regiune din spațiu delimitată, natural sau mintal, care cuprinde un ansamblu de microobiecte sau corpuri și cîmpurile pe care le generează și care se găsesc în interacțiune de natură mecanică, electrică sau magnetică etc.

ceea ce se numește *energie internă* a sistemului și se notează cu $U$.

În cazul gazelor ideale, energia internă este dată de suma energiilor cinetice medii ale tuturor moleculelor gazului și se exprimă prin relația

$$U = \frac{3}{2} NkT, \qquad (9)$$

în care $k$ este *constanta lui Boltzmann* $\left(k = \frac{R}{N_A} = \right.$ $= 1{,}3805 \cdot 10^{-23}$ J/K, $R$ fiind constanta universală a gazelor perfecte, egală cu 8 310 J/kmol · K, $N_A = 6{,}023 \cdot 10^{26}$ molecule/kmol — numărul lui Avogadro$\left.\right)$, iar $N$ numărul total de molecule din gazul considerat. Energia potențială a moleculelor nu se ia în considerare, deoarece interacțiunile dintre molecule sînt neglijabile chiar atunci cînd distanța dintre ele este de $10^{-7}$ m, adică la presiune normală.

Relația (9) arată că, *pentru un N dat, la aceeași temperatură toate gazele au aceeași energie internă.*

Dacă energia internă a unui sistem variază, atunci parametrii de stare ai sistemului s-au modificat. Această variație de energie internă poate avea loc atunci cînd sistemul face schimb de energie cu exteriorul: cedează sau primește energie, parametrii externi putîndu-se modifica (de exemplu, deplasarea unor corpuri) sau nu. Se mai spune că, în primul caz sistemul *a făcut schimb de energie cu exteriorul sub formă de lucru mecanic*, iar în al doilea caz, sistemul *a făcut schimb de energie cu exteriorul sub formă de căldură.*

Două exemple vor clarifica cele de mai sus. Să ne imaginăm un corp de pompă cu piston și în interior un gaz, de exemplu, aer. Dacă se acționează asupra pistonului, gazul poate fi comprimat sau decomprimat după sensul acțiunii. Pistonul deplasîndu-se, parametrii externi se modifică, deoarece prin aceasta se produce o variație de volum și deci sistemul (gazul) trece dintr-o stare în alta. Sistemul *a primit* la comprimare, respectiv *a cedat* la decomprimare, *energie*. Schimbul s-a făcut sub formă de lucru mecanic. La scară macroscopică s-a produs o mișcare ordonată — deplasarea pistonului. Aceasta a determinat o modificare a mișcării la scara microscopică, adică a produs o amplificare (la comprimare) sau o diminuare (la decomprimare) a mișcării dezordonate a moleculelor gazului, deci o variație a energiei interne a sistemului.



Dacă, însă, menținem pistonul imobil și punem gazul din corpul de pompă în legătură cu o sursă de căldură, adică încălzim gazul din exterior, parametrii externi nu se modifică, deoarece pistonul nedeplasîndu-se volumul a rămas constant. Nu se efectuează lucru mecanic asupra sistemului. În cazul cedării de energie, *energia schimbată* se manifestă sub formă de *lucru mecanic*, iar în cazul primirii de energie — sub formă de *căldură*. Se produce, însă, o intensificare a mișcării moleculare ca urmare a schimbului de energie sub formă de căldură, între sursa de căldură și gaz sau se poate spune că se produce un transfer de mișcare dezordonată de la sursa de căldură la gaz, rezultatul fiind încălzirea gazului. Reiese că energia internă a gazului a crescut, deoarece — așa cum am arătat mai sus — aceasta depinde numai de temperatură atunci cînd $N$ rămîne același [relația (9)].

În concluzie, putem spune că, în primul caz, datorită variației parametrilor externi, ca urmare a lucrului mecanic efectuat, s-a produs un transfer de mișcare ordonată (macroscopic) în mișcare dezordonată (microscopic). În cel de-al doilea caz, însă, are loc un transfer de mișcare dezordonată într-o mișcare de asemenea dezordonată. Așadar, există două forme precise, deosebite, de schimb de energie între un sistem și mediul ambiant: *lucrul mecanic* și *căldura.*

Căldura și lucrul mecanic sînt *mărimi fizice de proces*, deoarece între două stări ale unui sistem (corp) valorile lor depind de toate stările intermediare sau, cum se obișnuiește să se spună, de „drumul parcurs". Cu alte cuvinte, cele două mărimi fizice de proces intervin numai atunci cînd are loc schimbul de energie dintre sistem și mediu, adică în timpul trecerii sistemului termodinamic de la o stare la alta, în timpul *procesului fizic*, înțelegînd prin această noțiune (de proces fizic) *fenomenul trecerii unui sistem (corp) dintr-o stare în alta, datorită variației unor mărimi fizice care definesc, cantitativ, starea sistemului în orice moment* și care se numesc *parametri de stare.*

Ținînd seama de cele de mai sus, ne dăm seama că a spune că în timpul cît are loc schimbul de energie cu exteriorul, energia sistemului termodinamic se mărește sau se micșorează (după sensul schimbului), *este corect.* Dar a afirma că sistemul „posedă" o cantitate de lucru mecanic sau o cantitate de căldură, *nu este corect*, deoarece aceste mărimi

fizice nu caracterizează starea sistemului ci, așa cum reiese de mai sus, ele intervin în intervalul de timp cît are loc procesul transmiterii energiei de la mediul extern la sistem sau invers. Aceasta explică de ce $L$ și $Q$ *nu sînt mărimi fizice de stare, ci mărimi fizice de proces.*

Din cele arătate mai sus rezultă că unitatea de măsură pentru lucru mecanic și căldură trebuie să fie aceeași ca și pentru energie: joule.

Să considerăm acum un sistem termodinamic, de exemplu un gaz închis într-o incintă; măsurînd temperatura în diferite puncte ale acestui sistem (cît mai multe) găsim că ea are aceeași valoare. În cazul acesta se spune că sistemul se află în *echilibru termic*. Dacă, însă, două sisteme $A$ și $B$ avînd temperaturile $T_A$ respectiv $T_B$ ($T_A > T_B$) sînt aduse în contact și izolate adiabatic, se produce un schimb de energie sub formă de căldură de la corpul $A$ la copul $B$ (și numai așa) pînă ce stabilește un echilibru termic (cînd ambele sisteme au aceeași temperatură). În baza principiului conservării energiei vom spune că întreaga energie, sub formă de căldură, cedată de $A$ a fost primită de sistemul $B$.

Proprietățile generale ale sistemelor fizice care se găsesc în stări de echilibru termic și procesele prin care se ating astfel de stări constituie obiectul de studiu al termodinamicii. În această ramură a fizicii se mai studiază și mișcarea termică (formă de mișcare a materiei), precum și trecerea de la această formă de mișcare a materiei la alta.

Mișcarea termică înseamnă, așa cum am arătat mai înainte, mișcarea internă, complet dezordonată, a particulelor microscopice[1] ca atomi, ioni, molecule, care alcătuiesc corpurile macroscopice. Mișcarea termică se studiază atît din punct de vedere fenomenologic, cît și din punct de vedere statistic. Din punct de vedere fenomenologic se face abstracție de structura discretă — atomică și moleculară — a corpurilor macroscopice, ajungîndu-se la stabilirea unei teorii bazate direct pe fapte experimentale generalizate și sintetizate sub forma de principii. De altfel, istoric, termodinamica s-a dezvoltat înainte de a se cunoaște structura discretă a materiei.

Mișcarea termică se studiază fenomenologic în *termodinamică*, iar din punct de vedere statistic în *mecanica statistică*, ținîndu-se seama de structura discretă a corpurilor macroscopice și folosind statistica mișcărilor individuale ale microobiectelor care alcătuiesc corpurile macroscopice, avînd la bază legile mecanicii clasice sau ale mecanicii cuantice.

[1] Denumite, în fizica statistică, *microobiecte*.



Termodinamica s-a dezvoltat ca urmare a inventării și perfecționării mașinilor termice. Ca știință, însă, dezvoltarea termodinamicii a început odată cu analiza problemei construirii celei mai bune și mai eficiente mașini termice, analiză făcută de către Carnot în anul 1824.

Întreaga termodinamică se bazează pe trei principii. Primul principiu a fost descoperit, în mod independent, de către Julius Robert Mayer (medic, în vîrstă de 28 ani) și Herman von Helmholtz (fiziolog, în vîrstă de 32 ani) în Germania, James Prescott Joule (industriaș, 25 ani) în Anglia și L. A. Colding (inginer, în vîrstă de 27 ani) în Danemarca. Cel de-al doilea principiu a fost descoperit de Sadi Carnot (inginer, 34 ani). Se pare că în timpul cît a trăit Carnot nu se cunoștea primul principiu[1]. Cu alte cuvinte, cel de-al doilea principiu ar fi fost descoperit înaintea primului principiu. Cu toate acestea, studiul termodinamicii se face începînd cu primul principiu, deoarece nu ordinea istorică a descoperirii lor este importantă, ci ordinea logică, fiindcă conduce la o mai bună înțelegere a lor. În fine, cel de-al treilea principiu al termodinamicii s-a adăugat celorlalte două destul de tîrziu; el a fost stabilit de către Nernst și completat ulterior de către Planck.

În concluzie, mai putem afirma că termodinamica se ocupă cu studiul interdependențelor între fenomene termice și fenomene de altă natură, cum ar fi cele mecanice, electromagnetice ș.a.

Așa cum am arătat, o regiune din spațiu care cuprinde un număr foarte mare de microobiecte și pe care o delimităm mintal sau este delimitată natural, reprezintă un *sistem termodinamic*. Cînd sistemul termodinamic nu comunică cu exteriorul se spune că este un *sistem izolat*. Dacă sistemul

[1] Vezi, de exemplu, *Fizica modernă* de R. Feynman, vol. I, Editura tehnică, București, 1969, p. 689. Totuși în *Fizica*, vol. I, de R. Halliday și R. Resnick, apărută în Editura didactică și pedagogică, București, 1975, p. 577 (la nota de subsol) se afirmă că Sadi Carnot a ajuns el însuși la principiul conservării energiei înaintea tuturor celorlalți. Nu mi-am propus să stabilesc cine are dreptate. Important este ca cititorul să fie informat.

comunică cu exteriorul și totuși nu-și modifică masa, atunci se spune că sistemul termodinamic este un *sistem închis*.

Un sistem termodinamic este caracterizat printr-un grup finit de mărimi fizice, independente între ele, denumite *parametri de stare* ai sistemului (presiunea, volumul, temperatura).

Parametrii de stare a două sisteme termodinamice pot avea valori identice sau nu. În primul caz sistemele considerate sînt și ele identice și nu pot fi deosebite unul de altul prin nici un fel de experiențe care ar putea fi efectuate la scară macroscopică. În aceste condiții, grupul de parametri ai fiecărui sistem este complet și el determină, în orice moment dat, starea sistemului.

În termodinamică (și în fizică, în general) se definesc funcții care depind în mod exclusiv de grupul complet al parametrilor de stare și se numesc *funcții de stare ale sistemului* sau *mărimi fizice de stare. Energia, entropia* sînt *funcții de stare* și au un rol foarte important în termodinamică, în fizică. Cînd parametrii de stare rămîn constanți în timp, sistemul termodinamic se află într-o *stare staționară*. Dacă parametrii de stare sînt independenți de timp și lipsesc curenții staționari, atunci starea sistemului termodinamic este o *stare de echilibru*, iar parametrii de stare ce o caracterizează se numesc *parametri termodinamici*. Cînd starea unui sistem termodinamic se modifică odată cu schimbarea parametrilor de stare se spune că sistemul suferă o *transformare* sau un *proces*. Transformările pot fi *reversibile* sau *ireversibile*. Transformările reversibile sînt transformări ideale și ele constau din transformări finite, în care sistemul trece numai prin stări infinit de apropiate de stările de echilibru. Reversibilitatea este un caz limită în natură. Din punctul de vedere al termodinamicii, în cazul unui proces reversibil, sistemul trebuie să revină în starea inițială „pe același drum" pe care a trecut (prin aceleași transformări) din această stare în starea finală. În plus, ajuns în starea inițială mediul înconjurător trebuie regăsit neschimbat. Transformările ireversibile sînt, însă, reale și ele constau din transformări care decurg cu viteză finită și trec prin stări care nu sînt stări de echilibru termodinamic. De exemplu, la scara macroscopică fenomenele fizice sînt ireversibile; ele se produc de la sine numai într-un singur sens, din cauză că prin frecare se produce căldură. Neglijînd frecarea, așa cum se procedează în mecanică, fenomenele



studiate sînt fenomene reversibile și, ca atare, energia cinetică se transformă în energie potențială și invers, de la sine și integral. În aceste condiții, energia totală se conservă. De exemplu, în mișcarea oscilatorie a unui pendul. Vaporizarea și condensarea unui lichid sînt fenomene reversibile dacă se produc în vecinătatea temperaturii de vaporizare. Topirea și solidificarea sînt, de asemenea, fenomene reversibile în vecinătatea temperaturii de topire.

Dacă în urma transformării suferite de un sistem starea finală nu coincide cu starea inițială, atunci transformarea este *deschisă* sau *neciclică*, iar dacă cele două stări, finală și inițială, coincid, transformarea este *închisă* sau *ciclică* (în ciclu).

Datorită faptului că un sistem, atunci cînd schimbă căldură cu exteriorul, poate să primească din exterior energie sub formă de căldură sau să cedeze energie în exterior sub formă de căldură, se admite următoarea convenție de semne pentru $Q$: dacă sistemul termodinamic *primește* din exterior energie sub formă de căldură, atunci $Q > 0$, iar dacă sistemul cedează energie sub formă de căldură, $Q < 0$. Dar un sistem termodinamic poate să primească energie din exterior sub formă de lucru mecanic, adică asupra sistemului să se efectueze lucru mecanic sau sistemul să cedeze energie mediului exterior sub formă de lucru mecanic, adică să efectueze lucru mecanic. În primul caz $L < 0$, iar în cel de al doilea caz $L > 0$.

Se observă că, conform convenției semnelor pentru $Q$ și $L$, semnele acestor mărimi fizice de proces sînt contrare. Figura 8 redă intuitiv această convenție a semnelor.

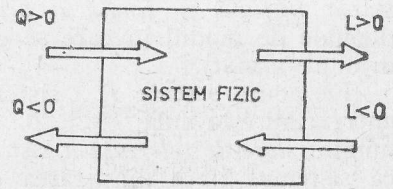



Fig. 8. Convenția de semne pentru căldură și pentru lucru mecanic.

*Principiul întîi al termodinamicii*

Am arătat mai sus că acest principiu a fost stabilit în mod independent de mai mulți cercetători, prin generalizarea unui mare număr de date experimentale. Dar primul principiu al termodinamicii este, de fapt, echivalent cu *legea generală de conservare a energiei*, lege care conține, evident,

și legea conservării energiei totale mecanice a unui sistem (lege care se demonstrează matematic; vezi p. 344). De aceea, ne vom ocupa succint de conservarea energiei și apoi de problema propusă prin titlul de mai sus.

Să considerăm un sistem pur mecanic, de puncte materiale. Starea dinamică a sistemului considerat poate fi cunoscută și aceasta echivalează cu a cunoaște poziția punctelor, precum și viteza lor. Toate punctele materiale ale sistemului au atît energie cinetică, cît și energie potențială gravitațională. Suma acestor energii reprezintă energia mecanică a sistemului și este o funcție de stare dinamică a sistemului. Presupunînd că sistemul este izolat și că trece dintr-o stare $A$ într-o stare $B$, stările fiind succesive, energia sistemului nu se schimbă (sistemul fiind izolat lipsesc forțele exterioare). Dacă notăm cu $U_A$ și respectiv cu $U_B$ energia sistemului în cele două stări, vom avea, evident, egalitatea

$$U_A = U_B.$$

Să presupunem acum că sistemul nu este izolat și că primește din exterior energie sub formă de lucru mecanic, $-L$, în timpul cît trece de la starea $A$ la starea $B$ sau, altfel spus, forțe exterioare efectuează asupra sistemului lucru mecanic $-L$. În acest caz vom scrie relația

$$U_B - U_A = -L \qquad (10)$$

și ea reprezintă *legea conservării energiei mecanice totale a unui sistem*. Aici se observă că lucrul mecanic efectuat în timpul transformării asupra sistemului, de către forțe exterioare, *depinde numai de cele două stări A și B, adică de starea inițială și finală a sistemului considerat*, dar nu depinde de modul în care se efectuează transformarea (de drumul urmat).

Fie acum o stare $R$ a sistemului în care, prin definiție, energia lui este nulă, $U_R = 0$. Această stare a sistemului o numim *stare de referință a sistemului*. Să presupunem acum că sistemul trece din starea de referință într-o stare $A$. Lucrul mecanic efectuat de sistem este $L_A$ și, în baza relației (10), putem scrie

$$U_A = -L_A \qquad (11)$$

deoarece $U_R = 0$.

Această relație ne permite să definim empiric energia sistemului în starea $A$. Vom spune că *energia sistemului în starea A este egală cu lucrul mecanic efectuat de sistem cînd trece din starea de referință (inițială) în starea* A. Și în acest caz lucrul mecanic efectuat de sistem trebuie să depindă numai de starea inițială și finală a sistemului și nu de modul particular în care se efectuează transformarea, cum de altfel am mai arătat.



Dacă s-ar dovedi, experimental, că relația (10) nu se verifică ar însemna ori că energia nu se conservă în sistemul considerat, ori că în sistem trebuie să existe și *alte forme* (în afară de lucrul mecanic) sub care se face schimb de energie și de care trebuie neapărat să ținem seama.

Să presupunem că în timpul unei transformări de la $A$ la $B$ sistemul considerat efectuează lucru mecanic și că acest lucru mecanic depinde numai de stările inițială și finală. În aceste condiții se poate folosi pentru definirea energiei relația (11).

Pentru a obține această relație vom proceda astfel: între două stări $A$ și $B$ vom considera o stare de referință astfel că sistemul trece printr-o transformare de la $A$ la $R$ și printr-o altă transformare de la $R$ la $B$. În timpul transformării de la $A$ la $R$ sistemul efectuează lucrul[1] mecanic, $-L_A$, iar de la $R$ la $B$, lucrul mecanic $+L_B$, încît lucrul mecanic total efectuat de către sistemul termodinamic considerat este

$$L = L_B + (-L_A)$$

și, evident, nu depinde decît de stările inițială și finală, fiind deci *independent* de faptul că întreaga transformare a fost efectuată printr-o succesiune de două transformări, adică independent de modul în care a decurs transformarea.

Pentru transformarea de la $R$ la $B$, folosim relația (10) și obținem

$$U_B = -L_B \qquad (12)$$

deoarece $U_R = 0$.

Substituind pe (11) și (12) în expresia lucrului mecanic total efectuat de sistem în timpul transformării de la starea $A$ la starea $B$, se regăsește exact relația (10).

Prin urmare, fie că asupra sistemului, în timpul transformării de la $A$ la starea $B$, se efectuează lucru mecanic

[1] De la $R$ la $A$ lucru mecanic ar fi $+L_A$, dar sistemul cedînd energie sub formă de lucru mecanic în timpul transformării de la $A$ la $R$, lucrul mecanic efectuat este $-L_A$.

de către forțele exterioare, fie că sistemul, în timpul transformării, efectuează lucru mecanic (cedează energie), expresia matematică a legii conservării energiei mecanice are exact aceeași formă. *Legea este generală.*

Facem observația că definiția energiei, prin relația (11) sau (12) depinde de alegerea stării de referință $R$.

Reamintim că, conform relației (10), lucrul mecanic efectuat de forțele exterioare asupra unui sistem în timpul transformării lui de la o stare $A$ la o stare $B$ depinde *numai* de cele două stări ale sistemului. Dacă, experimental, această ipoteză ar fi contrazisă, adică lucrul mecanic efectuat de sistem nu ar depinde numai de stările inițială și finală ale transformării pe care o suferă sistemul, ar însemna că, păstrînd legea conservării energiei, trebuie să admitem și alte forme sub care se face schimb de energie între sistem și mediul ambiant, nu numai lucru mecanic.

Pentru a ne lămuri mai bine vom apela la un exemplu concret și anume vom presupune că sistemul considerat este o cantitate de apă dată și că la presiune atmosferică acest sistem trece prin două stări $A$ și $B$ cărora le corespund temperaturile $t_A$ și $t_B$ ($t_B > t_A$).

Pentru ca sistemul să treacă de la starea $A$ la starea $B$ se pot folosi mai multe moduri (procedee). Aici vom descrie două dintre ele și anume: prin încălzirea sistemului și prin frecare. Alegînd primul procedeu, încălzim apa printr-un mijloc oarecare (o flacără sau un reșou electric). Prin încălzire temperatura acesteia va crește de la $t_A$ la $t_B$. În acest timp se produce o ușoară creștere a volumului apei și deci în mod corespunzător se va produce un lucru mecanic foarte mic[1], neglijabil, încît nu-l vom lua în considerare. Considerînd valabilă legea conservării energiei trebuie să admitem că energia primită de sistem, sub formă nemecanică, fără ca parametrii externi să se modifice, reprezintă căldura.

Celălalt procedeu menționat pentru a face ca temperatura apei să ajungă de la $t_A$ la $t_B$, deci ca sistemul să treacă de la starea $A$ la starea $B$, se poate aplica în modul următor (experiență efectuată de către Joule): în vasul cu apă introducem un ax prevăzut cu mai multe palete, fixat în lagăre și printr-un mecanism oarecare punem axul în mișcare de rotație. Se efectuează astfel un lucru mecanic ce va fi contracarat de lucrul mecanic datorită rezistenței

[1] Se știe că la $p = \text{const.}$, $\Delta L = p\,\Delta V$.



apei. Ca urmare a frecării paletelor de apă și a apei (pusă în mișcare) de pereții vasului, temperatura sistemului va crește după un anumit interval de timp de la $t_A$ la $t_B$. Ambele experiențe descrise arată că variația de energie a sistemului în timpul trecerii de la starea $A$ la starea $B$ diferă după procedeul folosit.

În baza acestor experiențe putem conchide că lucrul mecanic și căldura sînt echivalente, ambele reprezentînd energia schimbată cu exteriorul de către un sistem termodinamic *cu* sau *fără* variația parametrilor externi.

Să presupunem acum că introducem sistemul într-un recipient ermetic închis și izolat total (adiabatic) de exterior. Sistemul nu schimbă căldură cu exteriorul, însă facem ipoteza că schimbă lucru mecanic cu mediul ambiant. În baza legii conservării energiei, lucrul mecanic efectuat de sistem în timpul unei transformări oarecare va depinde numai de starea inițială și finală ale sistemului. Folosindu-ne de această experiență și de rezultatul ei, vom utiliza mai departe definiția mărimii $U$ ca o funcție numai de starea sistemului.

Sistemului considerat aici îi aplicăm formula (10)

$$L + \Delta U = 0 \tag{13}$$

unde cu $\Delta U$ am notat diferența $U_B - U_A$, care reprezintă variația de energie internă a sistemului cînd, în timpul transformării, acesta trece de la starea $A$ la starea $B$. (Energia internă însumează toate formele de energie pe care le au particulele sistemului și ea depinde de mărimile de stare internă.)

Dacă sistemul nu este izolat adiabatic, atunci el poate schimba energie sub formă de căldură cu exteriorul și atunci ecuația (13) se înlocuiește cu

$$L + \Delta U = Q \tag{14}$$

care este mai generală decît (13). Relația (14) se mai scrie

$$\Delta U = Q + L \tag{15}$$

ceea ce înseamnă că *variația energiei interne a sistemului termodinamic, atunci cînd trece de la o stare de echilibru la alta (în cazul de față în timpul transformării de la starea A la starea B) este dată de suma cantității de căldură și lucrului mecanic pe care le-a schimbat sistemul considerat cu exteriorul.*

În cazul de față vom înțelege prin $Q$ energia primită de sistem ($Q > 0$) sub formă de căldură, în timpul transformării de la starea $A$ la starea $B$, iar $L$ energia cedată de sistem sub formă de lucru mecanic.

Dacă sistemul ar efectua o transformare ciclică (închisă), starea finală ar coincide cu starea inițială și atunci $\Delta U = 0$, iar relația (15) ar deveni

$$L + Q = 0 \qquad (16)$$

relație mult mai simplă decît în cazul transformării neciclice (deschise) și care arată că sistemul poate furniza lucru mecanic numai dacă primește din exterior energie sub formă de căldură. Aceasta explică de ce este imposibil să se construiască un perpetuum mobile de speța întîia sau de tipul I.

Considerînd un sistem izolat, orice schimb de energie cu mediul extern este nul și deci, $Q = L = 0$ și expresia (15) devine $\Delta U = 0$ sau $U_2 = U_1$, ceea ce înseamnă că energia se conservă în cazul sistemelor izolate. Aceasta reprezintă *legea (principiul) conservării energiei.*

Relația (15) exprimă matematic conținutul *primului principiu al termodinamicii.*

Să presupunem că sistemul suferă o variație elementară a stării sale datorită faptului că a cedat o energie elementară sub formă de lucru mecanic $\delta L$ și a primit o energie elementară sub altă formă, $\delta Q$. Evident că variația de energie internă a sistemului va fi și ea elementară. În aceste condiții ecuația (15) devine

$$dU = \delta Q + \delta L. \qquad (17)$$

Pe baza relației (17) putem formula *primul principiu* al termodinamicii astfel: *orice sistem termodinamic într-o stare de echilibru are o variabilă de stare numită energie internă $U$, a cărei variație $dU$ într-un proces diferențial este dată de relația* (17). Putem conchide că principiul întîi exprimă cantitativ forma cea mai generală a legii conservării energiei, denumită și *legea generală de conservare a energiei*[1]. În relația (17) $\delta L$ este lucrul mecanic elementar care produce variația de energie internă $dU$, iar $\delta Q$ căldura elementară schimbată de sistem cu mediul înconjurător[2]. Simbolul $\delta$ lîngă mărimile fizice $L$ și $Q$ ne spune că aceste mărimi *nu* sînt funcții de stare pentru sistem, așa cum este energia internă $U$.

Mărimile $L$ și $Q$ *depind* de drumul urmat de sistem în timpul transformării pe care o suferă între stările inițială și finală.

În cazul în care sistemul, în timpul transformării, nu primește dar nici nu cedează energie sub formă de lucru mecanic, $L = 0$ și relația (15) devine

$$U = Q \quad \text{sau} \quad U_B - U_A = Q$$

$Q$ fiind energia primită de sistem sub formă de căldură.

Dacă sistemul este izolat adiabatic, atunci singura transformare pe care o suferă este transformarea adiabatică, deci $Q = 0$ și relația (15) se scrie

$$L = \Delta U. \qquad (18)$$

Ecuația (18) ne spune că sistemul efectuează lucru mecanic pe baza variației energiei sale interne. În fine, dacă sistemul nu schimbă cu exteriorul nici căldură și nici lucru mecanic, atunci energia lui internă se menține constantă.

Relația (18) se mai poate scrie sub forma $-L = U_A - U_B$ și ea arată că sistemul avea în starea inițială o anumită energie internă, $U_A$. Aceasta înseamnă că sistemul va efectua lucru mecanic pînă cînd se va epuiza această energie. Aceasta conduce la concluzia că este imposibil ca un sistem să efectueze continuu lucru mecanic fără să primească energie din exterior (și fără să se uzeze). Cu alte cuvinte, este imposibilă construirea unei mașini care să funcționeze continuu, la nesfîrșit, deci un *perpetuum mobile*, producînd lucru mecanic fără să consume energie din afară. Aceasta fiind o consecință a primului principiu al termodinamicii, o astfel de „mașină" a primit denumirea de *perpetuum mobile de speța întîi sau de tipul I.*

Și acum cîteva cuvinte în plus despre această „miraculoasă" mașină. De la început trebuie să spunem că mii și mii de oameni s-au străduit, de-a lungul secolelor, să construiască un perpetuum mobile de speța întîi (pe atunci nu se cunoștea această denumire). Toate încercările acestor oameni au fost zadarnice. Mulți dintre ei au căzut pradă mizeriei din cauza acestei idei fixe — descoperirea „perpetuum-ului mobile". Totuși, pe alocuri, astfel de căutări

[1] Vezi despre legi și principii în *Introducere* din lucrarea de față.

[2] Sau energia schimbată de sistem cu exteriorul fără modificarea parametrilor externi.

au condus la niște rezultate deosebit de fructuoase și valoroase. Așa s-a întîmplat cu fizicianul Stevin, care a reușit să descopere, cu acest prilej legile planului înclinat.

Ne dăm seama că construirea unei mașini care să furnizeze muncă gratuită reprezintă o țintă foarte seducătoare. De aceea, nu e de mirare că, în speranța atingerii ei, s-a pierdut mai mult timp decît pentru transmutarea aurului. Oamenii care s-au ocupat de această problemă au imaginat și au construit sute de „mașini perpetuum mobile", dar nici una din ele nu a funcționat decît un timp foarte scurt. Credem că este bine să descriem 2—3 instalații de acest fel pentru a ne face o imagine mai clară despre perpetuum mobile și imposibilitatea construirii lui.

În figura 9 se arată un exemplar de astfel de „perpetuum mobile". Așa cum se vede, unele sfere sînt mai apropiate de axul roții, altele mai depărtate și, pe rînd, în timpul mișcării, ele se vor găsi în astfel de situații. În total sînt 12 corpuri sferice. Fiecare corp sferic acționează asupra roții cu o forță dată de greutatea lui, prin intermediul tijei cu care este prins de roată. Brațele acestor forțe diferă între ele ca valoare și, de aceea, și momentele forțelor sînt diferite între ele, atît ca modul cît și ca semn. Într-adevăr:

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{G} \text{ și } M = Gr \sin \alpha = Gd.$$

Momentele corespunzătoare corpurilor *1—4* sînt negative, ele imprimînd roții o mișcare în sensul orar, în timp ce momentele

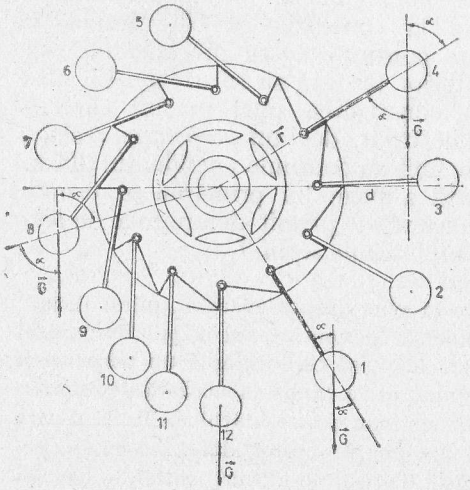



Fig. 9. Perpetuum mobile de speța I (tipul I).



forțelor ce corespund corpurilor *5—11* sînt pozitive, deoarece ele produc un efect de rotație în sens antiorar (trigonometric). Așa fiind, roata — odată scoasă din starea de repaus — ar fi trebuit să continue să se miște la nesfîrșit. Aceasta era convingerea autorului invenției. Dar, spre marea surprindere a inventatorului, roata se oprea destul de repede, după ce era pusă în stare de mișcare. De ce? Pentru că respectivul inventator nu a ținut seama de faptul că, chiar dacă efectul rotației determinat de momentul rezultant al momentelor negative este mai mare (cu puțin) decît momentul rezultant al momentelor pozitive (numai în condiții de echilibru și în lipsa frecărilor cele două momente rezultante sînt egale), frecarea fiind prezentă în mod permanent, se produce o frînare a mișcării, ceea ce atrage după sine și un fenomen de uzură a mașinii. În plus, datorită frecării au loc pierderi de energie sub formă de căldură, adică se produce un schimb de energie între „mașină" (sistem) și mediul înconjurător, fără o modificare a parametrilor externi. Pierderile de energie prin frecare și de lucru mecanic echivalent energiei sub formă de căldură schimbate cu exteriorul trebuie compensate pentru ca sistemul să continue să se miște. Aceasta se poate face numai dacă din exterior se comunică sistemului (roții) energie. Așadar, roata descrisă *nu* poate constitui un perpetuum mobile. Trebuie să reținem că perpetuum mobile *nu* înseamnă *numai* o mașină care să se *miște continuu*, furnizînd energie fără a i se comunica nimic din exterior, ci o astfel de mașină *nu* trebuie nici să se *uzeze*.

Un alt exemplu de perpetuum mobile este arătat în figura 10 și el a fost instalat ca reclamă la o mare cafenea din S.U.A. Invenția a aparținut unui escroc abil, care nu credea defel într-o

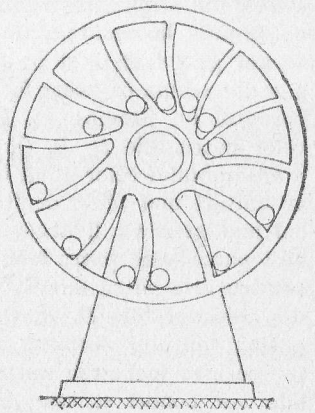


Fig. 10. Un alt perpetuum mobile de speța I (tipul I).

astfel de himeră, dar reușea să inducă în eroare pe destui creduli. Spectatorii credeau că bilele se rostogolesc mereu de la axa roții către periferia ei și întrețin astfel mișcarea perpetuă a roții. În realitate, însă, roata se mișca cu ajutorul unui mecanism foarte bine disimulat.

Construirea unui perpetuum mobile a preocupat și pe mulți ceasornicari. Dar și mașinile construite de ei au avut aceeași soartă. Unii ceasornicari necinstiți arătau publicului că mașina lor funcționează continuu, fără ca publicul să poată observa înșelătoria, fiindcă în realitate mișcarea mașinăriei era întreținută de un motoraș electric mic.

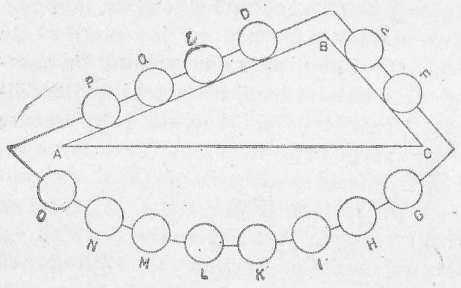



Fig. 11. Perpetuum mobile al lui Stevin.

Stevin a conceput un perpetuum mobile astfel: un dublu plan înclinat, ca în figura 11, unde $L = 2l$ ($L=AB$, $l=BC$), peste care a trecut un lanț închis, compus din 14 sfere legate între ele. Așa cum se vede și pe figură, pe planul cu lungime mare $L$ se rostogolesc 4 sfere, iar pe planul cu lungime mică $l$ numai două sfere. Stevin credea că sferele din stînga, rostogolindu-se, pun în mișcare lanțul, mișcarea continuînd la nesfîrșit, deoarece permanent pe planul mai lung se vor găsi 4 sfere și pe planul mai scurt 2 sfere. Imediat, însă, și-a dat seama că acest lucru este imposibil. Dar mai bine să dăm cuvîntul lui Stevin: „... Dacă greutatea aparentă a ansamblului celor patru bile $D$, $R$, $Q$, $P$ n-ar fi egală cu greutatea aparentă a ansamblului celor două bile $E$, $F$, unul dintre aceste ansambluri ar cîntări mai mult decît celălalt; să presupunem că ansamblul cel mai greu va fi acela al celor patru bile $D$, $R$, $Q$, $P$. Pe de altă parte, cele patru bile, $O$, $N$, $M$, $L$ au, evident, aceeași greutate cu cele patru bile $G$, $H$, $I$, $K$. Deci, partea lanțului formată din cele opt bile $D$, $R$, $Q$, $P$, $O$, $N$, $M$, $L$ va fi mai grea decît partea lanțului formată din cele șase bile $E$, $F$, $G$, $H$, $I$, $K$. Or, ce este mai greu antrenează ceea ce este mai ușor; cele opt bile vor coborî și cele șase vor urca. Să ne imaginăm că $D$ a



coborît pînă ce a luat locul bilei $O$, că $E$, $F$, $G$, $H$ s-au substituit la $P$, $Q$, $R$, $D$, în fine că $I$ și $K$ se găsesc unde erau $E$ și $F$. Coroana sau colierul de bile se va regăsi exact în aceeași situație ca la început; pentru același motiv, cele opt bile din stînga vor atîrna mai mult decît cele șase bile din dreapta; din nou, cele opt din dreapta vor urca. Astfel, aceste bile vor căpăta ele însele o mișcare continuă, ceea ce este fals".

De aici Stevin ajunge să rezolve problema echilibrului pe planul înclinat, ceea ce i-a adus celebritatea și recunoașterea pe care contemporaneitatea i le refuzase, refuz care provenea din neînțelegerea sensului demonstrației lui Ștevin; aceasta reiese limpede din afirmațiile lui Mersene: „Stevin demonstrează această propoziție arătînd că, dacă ea n-ar fi deloc adevărată, ar rezulta mișcarea perpetuă, pe care el o specificase ca absurdă. Dar unii pretind că el s-a înșelat în această privință, ca și Pappus... Ei gîndesc că se poate demonstra foarte clar eroarea acestei propoziții, la fel ca și eroarea lui Pappus".

În fine, cel mai interesant inventator și constructor al unui perpetuum mobile, care se bucura de o faimă mondială, a trăit în Evul Mediu și se numea Orfireu.

Acest inventator își prezenta mașina, care consta dintr-o roată care se mișca continuu, pe la iarmaroace, mulțimea minunîndu-se și admirînd faimoasa invenție. Faima lui Orfireu se răspîndi pe tot globul. Țarul Petru I a fost așa de impresionat încît a trimis la Orfireu un împuternicit ca să-i cumpere invenția miraculoasă. Cum, însă, Orfireu devenise prea plin de sine, a pretins pentru invenția sa o sumă fabuloasă. Ulterior, un arhiduce german, dorind să cunoască secretul mașinii, îl invită pe Orfireu la castelul său, dar cu condiția să-și aducă și faimoasa mașină. Orfireu acceptă. Arhiducele închise mașina într-o cameră pe care o sigilează și o ține sub observație timp de două săptămîni, dar miraculoasa mașină a funcționat fără întrerupere. După aceasta el a dat inventatorului un certificat de cele constatate. Orfireu ajunsese la apogeul carierei sale. Regii se interesau de opera sa, iar poeții îi cîntau ode. O întîmplare nefericită însă îl demască pe acest „savant" de faimă mondială. Despre ce e vorba? Într-o zi se ceartă cu soția și cu ucenicul și cum aceștia îi știau secretul invenției sale, drept răzbunare l-au denunțat. Ei au arătat că roata se mișca continuu din cauză că ucenicul, bine ascuns între

doi pereți ai cabinei în care se afla roata (fig. 12), manevra niște frînghii.

Este interesant că un oarecare Tyndall, într-o scrisoare către Newton, îi spune acestuia că: „... un oarecare Orfireu a construit o roată care se mișcă continuu, dar că după două luni a oprit-o pentru ca să nu se uzeze". Vedem de aici că un escroc[1] ca Orfireu

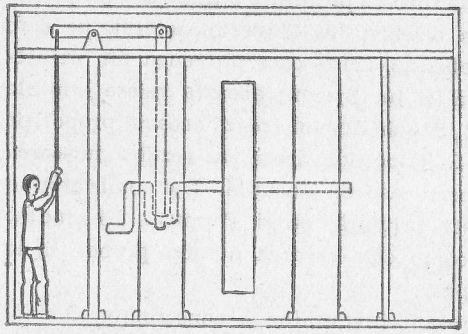


Fig. 12. Perpetuum mobile al lui Orfireu.

a fost în stare să inducă în eroare chiar pe un fizician ca Newton și aceasta pentru că nu se cunoștea precis ce înseamnă de fapt un perpetuum mobile.

Demn de reținut este faptul că în unele epoci goana după această himeră, *perpetuum mobile*, luase aspectul unei adevărate epidemii. De aceea, încă înainte de a se descoperi principiul conservării energiei, Academia franceză inclusese, în anul 1776, într-o declarație oficială faptul că este imposibil să se realizeze un perpetuum mobile și luase hotărîrea să nu mai primească pentru examinare, avizare, nici un proiect al unei astfel de mașini. Această hotărîre a fost luată mai mult pentru faptul că pe adresa Academiei soseau zeci de proiecte, cele mai multe primăvara, pe care aceasta trebuia să le supună unei examinări exigente, pentru a se putea pronunța asupra autenticității invenției.

Cu toate aspectele negative ale încercărilor de a construi un perpetuum mobile, acestea au avut, totuși, un rol pozitiv, deoarece într-un fel au condus la descoperirea principiului conservării energiei.

[1] Rugăm cititorul să scuze această etichetare neacademică, de altfel foarte potrivită lui Orfireu.



Am insistat asupra acestei probleme, deoarece, regretabil, mai sînt — foarte rar, e adevărat — cîte unii care pretind că au construit o astfel de mașină sau susțin posibilitatea unei astfel de construcții. Aceștia intră în contradicție flagrantă cu experiența și în același timp comit o eroare gravă împotriva logicii elementare, deoarece imposibilitatea construirii unui perpetuum mobile este o consecință directă, așa cum am arătat, a primului principiu al termodinamicii, a legilor mecanicii de la care pornesc ei, pentru a-și fundamenta invenția lor.

Considerăm că facem plăcere cititorilor lăsîndu-i să stabilească legătura dintre funcționarea acestor mașini și primul principiu al termodinamicii, mai ales că este foarte ușor.

Nu putem considera încheiată tratarea acestei probleme fără a aduce în discuție, chiar succint, contribuția remarcabilă, la vremea ei, a fizicianului român Constantin Miculescu, la dezvoltarea primului principiu al termodinamicii. Folosind un calorimetru, de construcție proprie, de o precizie excepțională, Constantin Miculescu a determinat, cu cea mai mare precizie cunoscută în literatura de specialitate, valoarea echivalentului mecanic al caloriei (raportul dintre lucrul mecanic efectuat de un sistem, exprimat în joule sau în kilogrammetri și căldura rezultată, echivalentă, exprimată în calorii sau în kilocalorii). Valoarea echivalentului mecanic al caloriei obținută de Miculescu devenise o constantă fundamentală a termodinamicii, fiind inclusă în tabelele internaționale de constante.

În prezent, lucrarea lui Constantin Miculescu prezintă numai importanță istorică, deoarece odată cu intrarea în vigoare a Sistemului Internațional de Unități de Măsură atît lucrul mecanic, cît și căldura se exprimă în joule și ca atare echivalentul mecanic al caloriei a devenit inutilizabil.

Constantin *Miculescu* (1863—1937) s-a născut în comuna Crevnicu-Rădulești, județul Teleorman. Urmează cursurile Liceului Matei Basarab din București, luîndu-și bacalaureatul în anul 1882. În anul 1885 este licențiat al Facultății de Științe din București, iar în 1888 licențiat al Universității din Paris, unde își

**Constantin Miculescu**

ia și doctoratul sub îndrumarea profesorului G. Lippmann (1891) cu tema „Determinarea echivalentului mecanic al caloriei prin metoda circulației apei în calorimetru". Valoarea obținută de Miculescu a fost cu mult mai precisă decît a unor mari fizicieni ca Lenz și d'Arsonval. Lucrarea lui Miculescu, devenită clasică, l-a impus lumii științifice datorită ingeniozității și preciziei mari a metodei precum și meticulozității cu care a fost efectuată.

*Principiul al doilea al termodinamicii*

Conform primului principiu al termodinamicii, lucrul mecanic se poate transforma în căldură și căldura în lucru mecanic; în cazul proceselor ciclice: $L + Q = 0$. Primul principiu nu indică o limitare a posibilităților de transformare a energiei dintr-o formă în alta. Experiența arată, însă, că lucrul mecanic se poate transforma direct în căldură. De exemplu, dacă batem cu ciocanul într-o bucată de metal acesta se încălzește sau dacă frecăm un corp, oricare ar fi temperatura lui, acesta se încălzește. Ne amintim foarte bine că iarna cînd ne îngheață mîinile, le frecăm și se încălzesc (în cazul acesta se activează și circulația sîngelui). De fiecare dată cantitatea de căldură dezvoltată este egală cu lucrul mecanic efectuat (sînt excluse pierderile de energie). Cînd un curent electric trece printr-un rezistor acesta se încălzește — energia electrică, sub formă de lucru mecanic, se transformă în căldură. Deci are loc o



transformare directă în căldură. În privința transformării căldurii în lucru mecanic[1] există unele limitări foarte precise. Căldura *nu* se transformă de la sine în lucru mecanic. Un exemplu: un corp cu masa de 100 kg căzînd de la înălțimea de 10 metri, în contact cu Pămîntul dezvoltă o căldură de $\approx 10^4$ J. Cu această căldură s-ar putea încălzi 10 kg de apă cu 2,4°C. Conform primului principiu al termodinamicii ar fi posibil ca, răcind 10 kg de apă cu 2,4°C să se obțină o căldură de $\approx 10^4$ J, egală cu lucrul mecanic necesar pentru a arunca un corp cu masa de 100 kg la înălțimea de 10 m. Or, experimental, este imposibil.

Dacă nu ar exista limitări în ceea ce privește posibilitatea transformării căldurii în lucru mecanic, ar însemna că ar fi posibil să se construiască o mașină capabilă să transforme căldura degajată prin răcirea corpurilor din jurul ei, în lucru mecanic. O astfel de mașină ar fi, evident, un *perpetuum mobile*, deoarece rezerva de căldură din atmosferă, din apă, din sol, este practic nelimitată. O astfel de mașină se deosebește de perpetuum mobile de speța întîi și a fost denumită *perpetuum mobile de speța a doua* sau *de tipul II.*

Principiul al doilea al termodinamicii arată că este imposibil a se construi un perpetuum mobile de speța a doua.

Un corp care se află în mod constant la temperatura $t$ și în astfel de condiții încît poate să schimbe energie numai sub formă de căldură (deci nu și lucru mecanic) cu corpurile din jur, reprezintă o *sursă de căldură.* Exemplul îl poate constitui o cantitate mare de apă dintr-un recipient închis și aflată tot timpul la temperatura $t$ (volumul apei se menține practic constant, deoarece cantitatea de apă care se evaporă este neglijabilă).

Cu această pregătire, preliminară, putem să trecem la enunțarea principiului al doilea al termodinamicii, care spune: *este imposibil a se realiza o transformare care să aibă ca singur rezultat final transformarea în lucru mecanic a căldurii absorbite de la o sursă de căldură, ce se află în întregime la temperatură uniformă.*

[1] Pentru simplificare, în cele ce urmează, prin lucru mecanic vom înțelege orice formă de energie diferită de căldură. De altfel, cititorul își amintește că lucrul mecanic reprezintă o energie transformată prin mișcare ordonată sau energia schimbată de un sistem cu exteriorul, parametrii externi modificînud-se.

Această formulare aparține lui lord Kelvin și Max Planck și, de aceea, a fost denumită *postulatul Kelvin-Planck*. În această formulare, partea esențială o constituie transformarea căldurii în lucru mecanic și acesta este unicul rezultat final al transformării. În realitate, este posibil a se transforma căldura luată de la o sursă de căldură direct în lucru mecanic, dar cu condiția ca la sfîrșitul transformării să se producă și alte schimbări în starea sistemului.

Formularea lui Kelvin și Planck pleacă de la imposibilitatea construirii unui perpetuum mobile de speța a doua.

O altă formulare a principiului al doilea al termodinamicii aparține lui Clausius *(postulatul lui Clausius): este imposibil a se realiza o transformare care să aibă ca unic rezultat final transferul de energie sub formă de căldură de la un corp cu o temperatură dată la un alt corp cu temperatură mai mare.*

Dacă aducem în contact două corpuri a căror temperatură diferă, atunci se produce un transfer spontan de energie sub formă de căldură, prin conducție, de la un corp la altul. Experimental s-a stabilit că corpul care cedează căldură[1] se află la temperatură mai mare. Ținînd seama de aceasta, postulatul lui Clausius se formulează și astfel: *dacă prin conducție are loc un transfer de căldură de la un corp A la un corp B, atunci este imposibil să se realizeze o transformare al cărui unic rezultat să fie transferul de căldură de corpul B la corpul A.*

Cele două postulate, Kelvin-Planck și al lui Clausius, exprimă fiecare, așa cum am arătat, principiul al doilea al termodinamicii. Aceasta înseamnă că ele trebuie să fie echivalente. Să arătăm că așa este, adică să demonstrăm echivalența lor.

Pentru aceasta vom folosi un procedeu cunoscut și anume: vom presupune că postulatul Kelvin-Planck nu exprimă adevărul. Dacă ar fi așa, ar însemna că energia sub formă de căldură luată de la o sursă de căldură cu temperatura $T_1$ ar putea fi transformată integral numai în lucru mecanic, adică rezultatul acestei transformări ar fi unic. Dacă, printr-un procedeu oarecare, de exemplu prin frecare, am transforma acest lucru mecanic în căldură, cu ajutorul căreia să

[1] Pentru comoditate vom folosi mai mult această expresie prescurtată. Vom înțelege, însă, că este vorba de o energie sub formă de căldură.



ridicăm temperatura unui corp, chiar dacă temperatura lui $T_2$ este mai mare decît $T_1$, ar însemna că este posibil să treacă energie sub formă de căldură de la un corp cu temperatură mai mică la un corp cu temperatură mai mare, ceea ce, evident, ar contrazice postulatul lui Clausius. Așadar, trebuie admis că postulatul Kelvin-Planck este adevărat, ceea ce atrage după sine faptul că și postulatul lui Clausius este adevărat. Deci aceste postulate sînt echivalente. Trebuie să reținem că ambele sînt și adevărate, deoarece sînt verificate de experiență; ele se bazează îndeosebi pe faptul că nu este posibilă construirea unui perpetuum mobile de speța a doua.

*Ciclul Carnot.* Așa cum arată postulatul Kelvin-Planck, este imposibil să se transforme de la sine căldura luată de la o sursă de căldură în lucru mecanic. Pentru a se produce totuși o astfel de transformare, fără schimbări în sistemul care o efectuează, trebuie cel puțin două surse de căldură, din care una la o temperatură $T_1$ și alta la o temperatură $T_2$, $T_1 \neq T_2$ (de exemplu, $T_1 > T_2$). Un ansamblu de două asemenea surse de căldură, una caldă și alta rece, împreună cu sistemul care efectuează transformarea căldurii în lucru mecanic, reprezintă ceea ce se numește o *mașină termică* (fig. 13). Fluidul care mijlocește transformarea primește căldura $Q_1$ de la sursa caldă cu temperatura $T_1$ și, după ce a avut loc transformarea căldurii în lucru mecanic, fluidul de lucru cedează căldura $Q_2$ sursei reci cu temperatura $T_2$. Astfel, căldura $(Q_1 - Q_2)$ se transformă în lucru mecanic.

Se pune însă următoarea problemă: ce condiții trebuie să îndeplinească o mașină termică pentru a funcționa cu avantaje maxime? Această problemă și-a pus-o Carnot, încă în 1824 și tot el i-a găsit și rezolvarea. Carnot a arătat că o mașină termică poate funcționa în cele mai bune condiții, deci cu randament maxim, dacă ea descrie o transformare ciclică reversibilă. Așadar, o mașină termică ce descrie un ciclu reversibil are randament maxim; ciclul respectiv se numește *ciclu Carnot*. Se mai spune că mașina

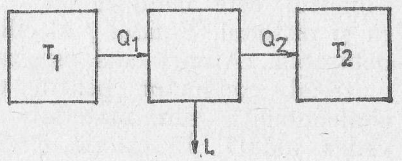



Fig. 13. Părțile componente ale unei mașini termice.

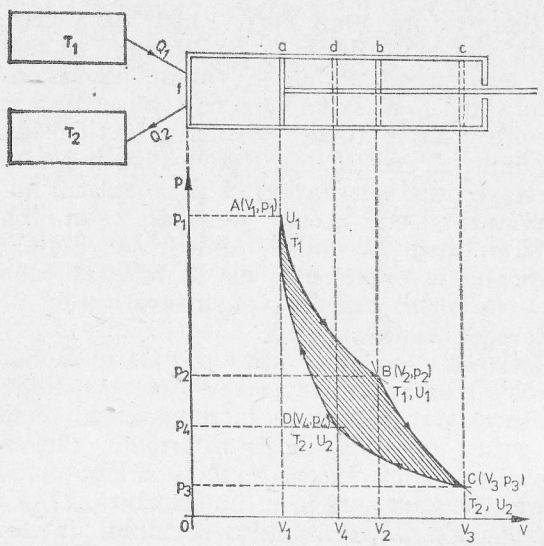



Fig. 14. Schema cea mai simplă a unei mașini termice și cidul Carnot.

termică transformă căldura în lucru mecanic prin procesul denumit ciclul Carnot. Dar, în natură procesele sînt ireversibile, iar după Carnot fluidul de lucru trebuie să descrie un ciclu reversibil. Prin urmare, ciclul Carnot este un *ciclu ideal* și deci și mașina termică ce funcționează după el este o mașină termică ideală. De aceea, ciclul Carnot este un *ciclu teoretic.*

În figura 14 este reprezentată o mașină termică ideală ce funcționează în patru timpi și diagrama ciclului Carnot. Să vedem acum cum funcționează. Mai întîi vom descrie mașina. Așa cum se vede din figură, aceasta constă dintr-un cilindru cu piston și două surse de căldură, avînd temperaturile $T_1$ și respectiv $T_2$ ($T_1 > T_2$). Sursele caldă și rece au astfel de dimensiuni încît în timpul cît cedează sau primesc căldură temperatura lor practic nu variază. Cilindrul este confecționat dintr-un material diatermic ca și pistonul. Fundul $f$ al cilindrului constă dintr-o placă detașabilă. Atunci cînd este necesar se așază o placă din material conductor pentru căldură, iar altădată una confecționată din material diatermic, așa cum vom vedea îndată. În interiorul cilindrului se află fluidul de



lucru. În faza inițială fluidul se află la presiunea $p_1$ și are volumul $V_1$, temperatura $T_1$ și energia internă, $U_1$. Se montează placa din material conductor, se face legătura cu sursa caldă de la care fluidul de lucru primește căldură $Q_1$, destinzîndu-se izoterm din poziția $a$ pînă în $b$ (pe grafic curba $AB$). În acest timp (timpul $I$) o parte din $Q_1$ se transformă în lucru mecanic, care este cedat în exterior.

Cînd pistonul a ajuns în poziția $b$ se întrerupe legătura cu sursa caldă și în locul plăcii conductoare se montează o alta din material diatermic. Fluidul se destinde adiabatic, efectuînd în exterior lucru mecanic pe seama variației energiei sale interne (timpul $II$). După ce pistonul a ajuns în poziția $c$ (punctul mort inferior), urmează timpul $III$, cînd placa $f$ este înlocuită cu placa conductoare de căldură și se face legătura cu sursa rece, iar pistonul se deplasează înspre punctul mort superior comprimînd izoterm fluidul, la temperatura $T_2$. Fluidul cedează sursei reci căldura $Q_2$. În acest caz se primește lucru mecanic din exterior. Cînd pistonul a ajuns în poziția $d$, se schimbă placa $f$, așezîndu-se placa diatermică. Pistonul continuă să se deplaseze comprimînd adiabatic fluidul de lucru închis în cilindru pînă cînd ajunge în poziția $a$ (timpul $IV$) ciclul închizîndu-se, după care poate reîncepe. Așadar, ciclul Carnot (este reversibil) constă din două transformări izoterme (pe fig. 14, curbele $AB$ și $CD$) și două transformări adiabatice (curbele $BC$ și $DA$). Lucrul mecanic efectuat de sistem ca urmare a succesiunii de transformări prin care a trecut substanța de lucru este

$$L = Q_1 - Q_2 \qquad (19)$$

conform ecuației (16) care exprimă primul principiu al termodinamicii pentru transformări ciclice. Relația (19) ne spune că numai o parte din căldura $Q_1$, primită de la sursa caldă, se transformă în lucru mecanic[1]. Căldura $Q_2$ este cedată sursei reci. Deci $Q_2$ nu se transformă în lucru mecanic.

Pe această bază, Carnot a conchis: *căldura nu se transformă integral în lucru mecanic, în cazul unui sistem care ar suferi o transformare ciclică reversibilă.* Această concluzie, denumită *principiul lui Carnot,* exprimă sub o altă formă

[1] Sistemul care suferă transformarea (substanța de lucru) nu este în permanență izolat adiabatic, după cum a reieșit din descrierea experienței.

principiul al doilea al termodinamicii. Se observă că este echivalent cu postulatul Kelvin-Planck și deci și cu al lui Clausius.

Randamentul ciclului Carnot este, prin definiție,

$$\eta = \frac{L}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \qquad (20)$$

În funcție de temperaturile celor două surse de căldură, randamentul are forma[1]

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \qquad (21)$$

Se observă că randamentul termic depinde numai de temperaturile celor două surse de căldură și este mai mic decît unitatea.

Nicole Leonard Sadi *Carnot* (1796—1832), fizician și inventator francez. Este autorul principiului al doilea al termodinamicii. Carnot a contribuit la elaborarea bazelor termodinamicii și prin cercetarea condițiilor de funcționare a mașinilor termice astfel ca randamentul lor să fie maxim.

Carnot a inventat ciclul termodinamic teoretic care îi poartă numele.

Substanța de lucru care descrie ciclul Carnot poate fi gazoasă, lichidă, solidă, amestecuri de substanțe solide sau fluide și ea dictează forma ciclului. Dacă randamentul unei mașini termice depinde sau nu de natura substanței ce evoluează, precum și legătura lui cu randamentul unei mașini termice nereversibile rezultă din concluzia[2] lui Carnot: *toate mașinile termice reversibile, care funcționează între aceleași două temperaturi, au același randament, iar randamentul mașinilor termice nereversibile, care funcționează între aceleași două temperaturi ca și mașinile reversibile, este întotdeauna mai mic decît al mașinilor reversibile*

$$\eta_{rev} > \eta_{nerev};$$

randamentul *nu depinde de natura substanței de lucru dacă condițiile de funcționare ale mașinilor reversibile sînt aceleași.*

[1] Relația se poate demonstra matematic.
[2] Denumită de unii autori teoremă.



Formula (21) arată că randamentul unei mașini termice este cu atît mai mare cu cît este mai mare diferența $T_1 - T_2$, adică cu cît $T_2$ este mai mic decît $T_1$. În cazul unui motor cu aburi, $T_1$ reprezintă temperatura generatorului de aburi, iar $T_2$ temperatura condensatorului. În cazul celorlalte motoare, $T_2$ reprezintă de obicei temperatura mediului ambiant. Pentru comparație arătăm că randamentul unei mașini cu aburi poate fi de 10—25%, iar al unui motor cu explozie de 35—45%. Un motor Diesel poate atinge un randament de 40—50%, iar mașinile electrice (motoare și transformatoare) 90—94%. În fine, acumulatoarele electrice au un randament de 75%. Prin urmare, randamente mari au mașinile care nu folosesc căldura, cum sînt: motoarele electrice, transformatoarele electrice, acumulatoarele electrice. De asemenea, randamente mai mari decît cele ale mașinilor termice se întîlnesc la turbinele hidraulice, în celulele vii etc.

Cel mai mare randament al unei mașini termice ar fi atunci cînd $T_2 = 0$ K, adică la zero absolut, ceea ce este, însă, imposibil de realizat.

Deoarece ciclul Carnot este reversibil, el poate fi parcurs și în sens invers. Toate transformările descrise anterior vor fi efectuate în ordine inversă. Sistemul va primi căldura $Q_2$ de la sursa rece și va ceda căldura $Q_1$ sursei calde. Pentru aceasta, însă, va primi din exterior lucrul mecanic $L = Q_2 - Q_1$, deoarece $Q_1 > Q_2$. Așadar, lucrul mecanic primit din exterior de către sistem servește la extragerea căldurii de la sursa rece (care are temperatura $T_2$, deci acesta se va răci mai mult) și la transferarea ei sursei calde a cărei temperatură este $T_1 (T_1 > T_2)$.

Sursa caldă își mărește temperatura, în timp ce sursa rece și-o micșorează mai mult. Pe această cale poate fi absorbită mereu căldură de la sursa rece și cedată sursei calde, adică ciclul se poate repeta. Acesta este principiul după care funcționează mașinile frigorifice.

Frigoriferul și pompa de căldură reprezintă două aplicații, foarte utile în practică, ale ciclului Carnot invers. În ambele instalații există o sursă caldă și alta rece. În ambele instalații mediul exterior constituie sursa de căldură: în cazul frigoriferului — sursa caldă, iar în cazul pompei de căldură — sursa rece. În ambele instalații are loc un transfer de

căldură de la sursa rece către sursa caldă *prin intermediul lucrului mecanic primit din exterior (energia electrică consumată)*.

Frigoriferul constă dintr-o incintă avînd temperatura $T_2 < T_1$, unde $T_1$ este temperatura mediului ambiant. Ca urmare a transferului de căldură de la sursa rece (interiorul incintei) la sursa caldă (mediul exterior) temperatura incintei coboară, astfel că sursa rece se „răcește" mai mult.

Pompa de căldură transferă căldura de la sursa rece (mediul ambiant) la sursa caldă (încăperea care trebuie încălzită). Pompa de căldură are aceeași utilizare ca și caloriferul și este folosită pentru încălzirea halelor industriale și a altor încăperi. Încălzirea cu ajutorul pompelor de căldură este mai economică decît încălzirea cu ajutorul caloriferelor. Totuși, încă, nu s-a generalizat.

Ne dăm seama că parcurgerea ciclului Carnot în sens invers nu vine în contradicție cu postulatul lui Clausius, deoarece acesta afirmă că *„de la sine* căldura *nu poate trece* de la un corp rece la altul cald".

Din acest exemplu înțelegem mai bine sensul cuvîntului „reversibil" atașat denumirii de mașină termică. Mașina termică reversibilă poate transmite căldura de la o sursă rece la alta caldă pe seama lucrului mecanic pe care-l primește din exterior. Ciclul Carnot este reversibil numai cu condiția ca să fie parcurs suficient de lent pentru a se trece succesiv numai prin stări de echilibru; este singurul ciclu cu randament maxim (pentru mașini termice). În practică se întîlnesc cicluri reale; acestea sînt nereversibile și ele nu pot fi reduse la un ciclu Carnot.

Organismele vii sînt mașini în care au loc transformarea simultană și directă a energiei chimice în lucru (mecanic sau de altă natură) și în căldură. Ele nu sînt mașini termice, ci „mașini" chemodinamice. În studiul organismelor se ia în considerare: lucrul mecanic, lucrul „celular", lucrul chimic, lucrul osmotic, lucrul de tensiune superficială, lucrul de secreție, lucrul de creștere ș.a. „Mașinile" chemodinamice au un randament teoretic de aproape 100%, adică mai mare decît al ciclului Carnot. În realitate, însă, randamentul lor este de numai 30—40%, din cauză că există un consum de energie pentru menținerea echilibrului.

Ciclul Carnot permite să se definească o nouă mărime fizică de importanță fundamentală, mărime care este o funcție de stare și se numește *entropie*. Denumirea provine



din grecește, de la „en" care înseamnă *în* și „trope" care înseamnă *orientare*. Această nouă funcție de stare a fost introdusă în anul 1865 de către Clausius, cu scopul de a da o formulare matematică principiului al doilea al termodinamicii. Entropia unui sistem închis indică sensul în care evoluează macroscopic sistemul.

Din relațiile (20) și (21), rezultă

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}. \tag{22}$$

Cum însă $Q_1 > 0$ și $Q_2 < 0$, deoarece $Q_1$ reprezintă căldura primită de sistem, iar $Q_2$ căldura cedată de sistem, relația (22) se scrie

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0. \tag{23}$$

Prin urmare, *într-un proces ciclic reversibil de tip Carnot suma algebrică a cantităților $Q/T$ este egală cu zero.* În cazul proceselor ciclice nereversibile suma algebrică a cantităților $Q/T$ este negativă, adică

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} < 0. \tag{24}$$

Relațiile (23) și (24) putem să le exprimăm prin una singură

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leqslant 0$$

sau

$$\sum \frac{Q}{T} \leqslant 0.$$

Să presupunem că o mașină termică ar avea o multitudine de puncte de contact cu surse de căldură, calde și reci, cum este cazul oricărui sistem, care — fără a fi o mașină termică propriu-zisă — absoarbe energie sub formă de căldură și cedează energie sub formă de lucru mecanic sau primește energie sub formă de lucru mecanic și-l transformă în căldură, printr-o serie de procese ciclice suprapuse. În cazul în care un astfel de sistem funcționează reversibil, el echivalează cu o multitudine de mașini termice cuplate,

care ar parcurge atîtea cicluri Carnot cîte mașini cuplate ar fi și împreună ar descrie un ciclu Carnot total, reversibil. Dacă notăm cu $\Delta Q_i$ energia sub formă de căldură schimbată de sistem cu sursele de căldură și cu $T_i$ temperaturile surselor, atunci, conform relației (23), vom scrie pentru întregul ansamblu

$$\frac{\Delta Q_1}{T_1} + \frac{\Delta Q_2}{T_2} + \frac{\Delta Q_3}{T_3} + \ldots + \frac{\Delta Q_n}{T_n} = \sum \frac{\Delta Q}{T} = 0. \quad (25)$$

În cazul unei infinități de puncte de contact ale sistemului cu o infinitate de surse de căldură, energia sub formă de căldură schimbată între sistem și sursele de căldură ar fi infinit mică și relația (25) devine[1]

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0. \quad (26)$$

În cazul ciclurilor Carnot nereversibile ecuația (26) se va scrie

$$\oint \frac{\delta Q}{T} < 0. \quad (27)$$

Relațiile (26) și (27) se pot exprima prin una singură

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leqslant 0. \quad (28)$$

Aceasta este *relația lui Clausius.*

Rudolf *Clausius* (1822—1888), fizician german. În anul 1850 a formulat pentru prima oară, foarte clar, al doilea principiu al termodinamicii sub forma principiului imposibilității transmiterii de la sine a căldurii de la un corp mai rece la altul mai cald. În 1865 introduce noțiunea de entropie și cu ajutorul ei explică, printre primii, căldurile specifice ale gazelor poliatomice și conductibilitatea termică a gazelor. Clausius este unul dintre fondatorii teoriei cinetice-moleculare a gazelor. Se mai ocupă și elaborează o serie de lucrări din domeniul electricității și magnetismului.

[1] Integrala curbilinie ne spune că se face însumarea tuturor cantităților infinitezimale $\delta Q/T$ pe întreaga curbă închisă ce definește ciclul parcurs.



Membrul întîi al ecuației (26), reprezentînd integrala unei mărimi de-a lungul unui drum închis, este egal cu zero. De aceea, această mărime se numește *variabilă de stare*, valoarea ei fiind caracteristică numai pentru starea sistemului, nedepinzînd de modul în care a ajuns sistemul în starea respectivă. Această variabilă este numită *entropie*[1] și se notează cu $S$; este determinată prin

$$S = \frac{\Delta Q}{T} \text{ sau } dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (29)$$

și deci, relația (28) se poate scrie

$$\oint dS \leqslant 0.$$

În concluzie, entropia unui sistem este o *mărime fizică de stare* (căldură și lucrul mecanic *nu sînt* mărimi de stare, *ci* mărimi fizice de proces).

Entropia este o mărime scalară, ca și mărimile care o definesc, $Q$ și $T$; ea se exprimă în J/K.

Ca și pentru energie, pentru entropie se alege arbitrar un zero convențional. Pentru a defini entropia se alege o stare de echilibru a sistemului denumită *stare de referință;* o vom nota cu $R$. Se consideră apoi o altă stare de echilibru $A$ și folosind (29) se ia integrala

$$S_A = \int_R^A \frac{\delta Q}{T} \quad (30)$$

de-a lungul unei transformări reversibile, integrală ce depinde numai de stările $R$ și $A$ și nu depinde de transformarea particulară reversibilă de la $R$ la $A$. Totuși starea de referință $R$ fiind fixată, se poate spune că $S_A$ este o funcție numai de starea $A$. Funcția $S_A$ este numită *entropie a stării A*.

Considerînd două stări de echilibru $A$ și $B$, în care entropia sistemului este $S_A$ și respectiv $S_B$, se poate demonstra că

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{\delta Q}{T} = \int_A^B dS \quad (31)$$

[1] Cu alte cuvinte, integrala fiind nulă pentru transformări ciclice reversibile, înseamnă că $\delta Q/T$ este o diferențială totală exactă a unei funcții de stare. Această funcție de stare este entropia.

integrala fiind calculată de-a lungul unei transformări reversibile de la starea $A$ la starea $B$. Relația (31) arată că în cursul transformării suferite de sistem are loc o variație de entropie $\Delta S = S_B - S_A$, care depinde numai de starea inițială ($A$) și de starea finală ($B$), dar nu depinde de modul în care se face trecerea de la starea $A$ la starea $B$.

Dacă sistemul este izolat și suferă o transformare ciclică (închisă) reversibilă, atunci variația entropiei este nulă, deoarece starea finală coincide cu starea inițială. Relația (31) dă

$$\Delta S = S_B - S_A = 0 \quad \text{și} \quad S_B = S_A = \text{const.}$$

Prin urmare, într-o transformare ciclică reversibilă entropia sistemului împreună cu cea a mediului este tot timpul constantă. Iată cum se întîmplă aceasta: dacă $\delta Q$ este căldura transmisă sistemului de către mediu, entropia mediului scade cu $\delta Q/T$, iar entropia sistemului crește cu $\delta Q/T$. Variația netă de entropie a sistemului plus mediu este nulă.

De reținut faptul că, practic, nu interesează atît entropia cît variația de entropie deoarece aceasta prezintă importanță în studiul evoluției unui sistem.

În cazul unui sistem complet izolat avem $Q = 0$, singura transformare în interiorul sistemului fiind o transformare adiabatică; relația (31) se scrie

$$S_B - S_A \geqslant 0 \text{ sau } S_B \geqslant S_A. \qquad (32)$$

Relația (32) arată că într-un sistem izolat *transformările decurg astfel încît entropia stării finale nu poate fi mai mică decît entropia stării inițiale*, cu alte cuvinte *entropia sistemului crește sau rămîne constantă*. Într-adevăr, în cazul că transformările sînt reversibile atunci se ia semnul egal și deci

$$S_B = S_A = \text{const.},$$

adică entropia sistemului nu se modifică. Transformarea este închisă.

Dacă sistemul se află într-o astfel de stare încît entropia sa este maximă, el nu suferă nici o transformare, deoarece orice transformare ar determina o scădere a entropiei. De aici rezultă că *pentru un sistem izolat starea cea mai stabilă este aceea în care entropia este maximă.*



Vom da acum exemple din care să reiasă că într-un sistem izolat toate transformările decurg astfel încît entropia crește. Într-un prim exemplu vom considera un sistem avînd în două părți ale sale temperaturile $T_1$ și respectiv $T_2 (T_1 < T_2)$. Așa fiind, partea mai caldă va ceda energie sub formă de căldură, $Q$, care va fi transmisă prin conducție părții mai reci. Aceasta va determina o variație a entropiei părții reci cu $\Delta S_1 = \frac{Q}{T_1}$ și a părții calde cu $\Delta S_2 = -\frac{Q}{T_2}$, încît variația totală de entropie a sistemului să fie

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = \frac{Q}{T_1} - \frac{Q}{T_2}.$$

Se observă că $\Delta S > 0$, deoarece $T_2 > T_1$. Așadar, entropia totală a sistemului a crescut.

Fie acum un sistem și o parte a sa ($A$) încălzită prin frecare. Căldura provine numai din lucrul mecanic efectuat. În această parte a sistemului entropia a crescut și cum în altă parte ($B$) a sistemului nu se produce o scădere a entropiei pentru a compensa creșterea din prima parte, rezultă că entropia totală a sistemului a crescut.

Acum putem formula astfel principiul al doilea al termodinamicii: *un proces natural care pornește dintr-o stare de echilibru și se sfîrșește într-o altă stare de echilibru se va desfășura în sensul care duce la o creștere a entropiei sistemului plus mediul.* Această formulare este echivalentă cu postulatul Kelvin-Planck, postulatul lui Clausius sau cu principiul lui Carnot.

Din cele de mai sus rezultă că atunci cînd, în cursul unei transformări reversibile, sistemul considerat *primește energie sub formă de căldură* ($Q > 0$) *entropia sistemului crește*; dacă însă în cursul transformării reversibile sistemul *cedează energie sub formă de căldură* ($Q < 0$), *entropia sistemului scade*. În fine, în cazul unui sistem izolat adiabatic entropia sistemului *crește* dacă transformările care au loc sînt *ireversibile* și este *constantă* cînd transformările sînt *reversibile*. O astfel de transformare adiabatică reversibilă în care entropia se menține constantă se numește *transformare izoentropică (izentropică) reversibilă.*

În cazul organismelor vii, așa cum susțin unii autori, funcționarea lor determină o creștere a entropiei ca și la mașinile termice. Această creștere de entropie ar produce o

uzură a acestor mașini chemodinamice, uzură tradusă prin îmbătrînirea și moartea lor. Acești autori omit, însă, faptul că organismele vii nu sînt mașini termodinamice, ci „mașini" chemodinamice și, de aceea, funcționarea lor determină nu numai o creștere a entropiei, ci și o descreștere a ei. Aceste două tendințe opuse se echilibrează, asigurîndu-se astfel viabilitate organismelor. Numai atunci cînd se strică echilibrul apar fenomenele de îmbătrînire și încetarea viabilității.

În lucrarea intitulată „Ce este viața? și Spirit și materie", publicată la Cambridge[1] în anul 1955, E. Schrödinger arată că, dacă entropia este o expresie a dezordinei, apariția formelor din ce în ce mai complexe și din ce în ce mai ordonate (este vorba de forme celulare și supracelulare organizate — N.A.) reprezintă o variație de entropie negativă. Oamenii de știință consideră că entropia negativă caracterizează viața.

Cibernetica biologică a introdus noțiunea de *informație structurală*, care este *negentropie*, în scopul caracterizării structurilor și a formelor organizate specific. Informația structurală, care — așa cum am arătat — este entropie negativă, este opusă dezorganizării haotice.

Prin 1955, doi oameni de știință români, M. Pop și V. Săhleanu, ocupîndu-se de cercetarea proceselor fiziologice, au interpretat într-un mod original variația entropiei în timpul acestor procese. Ei au arătat că: „Adaptarea și salturile întîlnite în biologie pot fi considerate ca treceri de la o stare staționară la altă stare staționară a unui sistem deschis. Această trecere se face de obicei printr-o fază tranzitorie de dezorganizare, în care entropia sistemului crește. Entropia sistemului crește și din alte cauze... Creșterea entropiei pînă la atingerea stării de echilibru termodinamic ar însemna însă moartea celulei, deoarece în această fază celula ar conține substanțe răspîndite haotic. Această atingere este împiedicată prin intervenția proceselor refractare și compensatoare (inclusiv a proceselor metabolice compensatoare), care tind să readucă sistemul spre nivelul inițial".

Fenomenele naturale, așa cum am mai arătat, sînt ireversibile. Aceasta înseamnă că diferitele procese care au loc într-un sistem izolat vor determina o creștere a entropiei.

[1] E. Schrödinger, *Ce este viața? și Spirit și materie.* Editura politică, București, 1980.



Dacă sistemul nu este izolat, atunci alte sisteme cu care ar veni în contact vor determina o scădere a entropiei lui, însă entropia ansamblului nu scade.

*Concluzie: entropia unui sistem izolat în care au loc procese nereversibile crește continuu.*

Chiar dacă ar exista unele diferențe de temperatură, acestea ar dispare și, cum fenomenul este ireversibil, urmează că entropia sistemului nu va putea să scadă niciodată, ci va crește mereu. De aici se desprinde o altă concluzie și anume: *evoluția naturală a unui sistem izolat se produce într-un singur sens, care nu se poate inversa de la sine.*

Plecînd de la aceste două concluzii și considerînd Universul ca un sistem izolat, Clausius a conchis că acesta evoluează către o stare finală în care entropia va fi maximă și care va fi starea cea mai stabilă, cînd diferențele de temperatură vor dispare și, ca urmare, orice schimb de energie va fi nul, iar fenomenele vitale, biologice, imposibile. Aceasta a condus la ipoteza *„morții termice" a Universului*, îmbrățișată de unii naturaliști, ipoteză în care se afirmă că „toate formele mișcării trebuie în mod inevitabil să se transforme în căldură, iar căldura, răspîndindu-se în mod uniform în întregul Univers, aceasta va ajunge la un echilibru și va pierde însușirea de a se transforma, din care cauză vor înceta toate procesele din natură".

Or, ne dăm seama cu ușurință că această ipoteză este total eronată, nefondată, deoarece Universul nu poate fi conceput ca un sistem izolat, deci finit; este infinit în spațiu și în timp și ca atare nu i se pot aplica cele două concluzii de mai sus.

Cele două principii ale termodinamicii se deosebesc între ele, dar cel de-al doilea îl completează pe primul. Astfel, primul principiu fiind echivalent cu legea conservării energiei, arată că energia se conservă și se transformă, fără a indica însă sensul în care decurge transformarea. Lucrul mecanic se transformă în căldură și căldura se transformă în lucru mecanic. Al doilea principiu, însă, este un principiu de evoluție, care arată că în orice sistem izolat evoluția naturală decurge numai în sensul creșterii continue a entropiei, adică în sensul atingerii unei stări de echilibru în care, cu timpul, să dispară schimburile de energie. Căldura nu se transformă de la sine în lucru mecanic.

O mașină termică a cărei funcționare ar fi în contradicție cu principiul al doilea al termodinamicii, adică ar funcționa

cu o singură sursă de căldură, s-ar numi *perpetuum mobile de speța a doua sau de tipul II*. În acest sens să ne imaginăm un vas maritim de linie, echipat cu un astfel de perpetuum mobile. Căldura necesară funcționării ar lua-o din apa mării introdusă prin pomparea ei în rezervorul cald. Funcționînd cu o singură sursă de căldură înseamnă că, după ce ar absorbi căldura necesară din apă, aceasta s-ar transforma în gheață, care, evident, ar trebui aruncată și iar s-ar pompa apa din mare în rezervorul cald și gheața rezultată ar fi aruncată și așa mai departe. Sau, să presupunem că s-ar monta pe automobile sau pe avioane motoare termice cu o singură sursă de căldură și că aceste motoare ar absorbi căldura necesară funcționării din aerul atmosferic. Evident că pe țevile de eșapament ar trebui să iasă jeturi de gheață. Ce bine ar fi dacă s-ar putea construi astfel de mașini și autovehicule! Am avea la dispoziție mijloace de transport extrem de economice, cu cel mai mare randament posibil. Din păcate, principiul al doilea al termodinamicii ne readuce la realitate, spunîndu-ne că aceasta este imposibil.

Principiile termodinamicii pot fi interpretate din punctul de vedere al fizicii statistice. În cele ce urmează vom expune succint această interpretare.

Știm că o creștere sau o scădere a energiei cinetice medii de translație a moleculelor se traduce la scară macroscopică printr-o creștere, respectiv scădere a temperaturii și invers. Așa fiind să vedem ce se întîmplă atunci cînd un corp este frecat sau lovit. Corpul care freacă (lovește) are pînă în momentul contactului cu corpul studiat o mișcare ordonată; toate particulele lui descriu în timpul mișcării traiectorii paralele, pentru că au același sens de mișcare și aceeași viteză. Corpul în întregime are o anumită energie cinetică, pe care o cedează, în timpul frecării sau lovirii, moleculelor locului frecat (lovit). Aceste molecule își măresc astfel energia lor, cedînd-o apoi moleculelor vecine ș.a.m.d., astfel încît, în final, în exterior se constată o creștere a temperaturii.

În timpul scurt în care se produce egalizarea temperaturii corpului analizat, agitația termică a moleculelor din zona frecată sau lovită manifestă o tendință preferențială, către interiorul corpului, care este numai tranzitorie, deoarece conform legilor statisticii în curînd ea trece în dezordine totală.

Întreaga energie cinetică a mișcării ordonate a corpului care freacă (lovește) este transmisă moleculelor corpului



frecat (lovit) sub formă de energie cinetică (desigur, admițînd că nu au avut loc variații ale energiei potențiale interne), conform legii conservării energiei, conținută în primul principiu al termodinamicii.

Prin urmare, atunci cînd lucrul mecanic se transformă în căldură, mișcarea ordonată se transformă într-o mișcare dezordonată. Cum în desfășurarea proceselor naturale intervin frecări sau ciocniri, rezultă că într-un sistem izolat se va manifesta o tendință de trecere de la mișcări ordonate către mișcări dezordonate. Variația energiei interne, ca urmare a acestui proces, reprezintă căldura produsă prin transformarea lucrului mecanic efectuat. Sistemul tinde astfel către o stare cu o entropie maximă.

În ceea ce privește transformarea căldurii în lucru mecanic înseamnă, evident, revenirea de la mișcarea dezordonată la mișcarea ordonată. Pentru a explica în mod inteligibil această revenire și deci transformarea căldurii în lucru mecanic este necesar să apelăm la noțiunea de probabilitate.

Să ne imaginăm un vas paralelipipedic, prevăzut cu un perete mobil care să separe spațiul interior în două compartimente $A$ și $B$ (fig. 15). Să presupunem că în compartimentul $A$ se află o singură moleculă. Aceasta se va mișca, evident, dezordonat. La un moment dat scoatem peretele despărțitor $P$. Molecula va trece în compartimentul $B$, apoi din nou în $A$ ș.a.m.d. În acest caz, mișcarea moleculei reprezintă un fenomen reversibil. Dacă așezăm peretele $P$ în momentul cînd molecula a ajuns din nou în $A$ înseamnă că s-a reprodus spontan starea inițială. Probabilitatea ca

Fig. 15. Pentru ilustrarea noțiunii de probabilitate.

molecula să se găsească în compartimentul $A$ este egală cu

$$W_1 = \frac{\text{numărul cazurilor favorabile}}{\text{numărul cazurilor posibile}} = \frac{1}{2}.$$

Dacă notăm, în general, cu $n$ numărul cazurilor favorabile și cu $N$ numărul cazurilor posibile, atunci probabili-

tatea realizării unei situații în sensul celor arătate mai sus, se va scrie

$$W = \frac{n}{N}. \qquad (33)$$

Repetăm experiența, de data aceasta cu două molecule în compartimentul $A$. Figura 16 redă posibilitatea ca moleculele să se afle într-unul din compartimente. Ne dăm seama

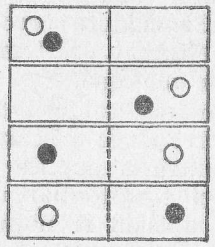


Fig. 16. Pentru ilustrarea noțiunii de probabilitate.

că acum sînt patru cazuri posibile de repartiție ($N = 4$), dar numai unul dintre ele este favorabil ($n = 1$). Deci probabilitatea acestei situații va fi, conform formulei (33),

$$W_2 = \frac{1}{4} = \frac{1}{2^2}.$$

Așadar probabilitatea ca cele două molecule să se afle în $A$ este 1/4. Dar, pentru ca moleculele să se repartizeze uniform sînt posibile două stări microscopice, deci probabilitatea existenței stării termodinamice cu o repartizare uniformă a moleculelor este egală cu 2/4.

Continuăm raționamentul, presupunînd că în compartimentul $A$ sînt trei molecule. Probabilitatea de revenire spontană a celor trei molecule în starea inițială, adică în compartimentul $A$ (fig. 17) este

$$W_3 = \frac{1}{2^3}.$$

Generalizînd pentru $n$ molecule, probabilitatea de revenire spontană a lor $n$ în starea inițială este

$$W_n = \frac{1}{2^n}.$$



Dacă ne referim la un centimetru cub de aer, care conține $3 \cdot 10^{19}$ molecule, la presiune și temperatură normală, va trebui să așteptăm de $2^{3 \cdot 10^{19}}$, ori mai mult, pînă cînd toate moleculele vor reveni spontan în $A$. Dar această revenire spontană a celor $3 \cdot 10^{19}$ molecule în compartimentul

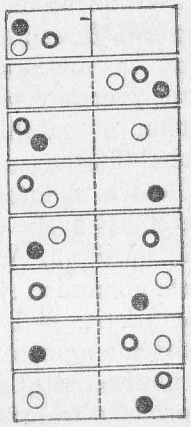


Fig. 17. Pentru ilustrarea noțiunii de probabilitate.

$A$ este imposibilă; ea devine, însă, cu atît mai posibilă cu cît numărul de molecule este mai mic și cu atît mai mică cu cît numărul de molecule este mai mare.

În mod normal, moleculele au o mișcare de agitație termică. Vitezele lor au cele mai diferite direcții și sensuri și, de aceea, se spune că mișcarea este haotică, dezordonată. Să presupunem că la un moment dat, și în mod spontan, moleculele în totalitatea lor (sau un mare număr dintre ele) se deplasează în același sens. Atunci, mișcarea lor devine total sau parțial ordonată și astfel căldura s-ar putea transforma în lucru mecanic. Dacă numărul de molecule este mic, fenomenul este probabil, iar dacă numărul de molecule este foarte mare fenomenul devine improbabil, practic imposibil. Acest rezultat ar echivala cu a produce lucru mecanic folosind o singură sursă de căldură.

Am văzut, însă, că principiul al doilea al termodinamicii exclude posibilitatea construirii unui perpetuum mobile de speța a doua.

Principiul al doilea al termodinamicii *nu* se aplică la scară moleculară, ci numai la scară macroscopică. La scara microscopică, moleculele se manifestă individual și feno-

menele se desfășoară după legi nestatistice. Mișcarea fiecărei molecule luată separat este reversibilă, în timp ce mișcarea ansamblului moleculelor este ireversibilă. Explicația se bazează, așa cum ne-am putut da seama, pe noțiunea de probabilitate a diverselor fenomene și pe calculul statistic al celor mai probabile stări.

În ceea ce privește transformarea lucrului mecanic în căldură, aceasta înseamnă—așa cum am arătat mai înainte—trecerea de la mișcarea ordonată la mișcarea dezordonată. Acest proces este probabil.

Boltzmann a stabilit o relație care exprimă legătura dintre probabilitatea unui tip de mișcare moleculară și entropie. Pentru a înțelege relația, stabilită prin demonstrație matematică de către Boltzmann, vom apela la o cale simplă, intuitivă. Astfel, vom considera mai întîi două sisteme termodinamice $A$ și $B$, de exemplu două vase conținînd gaze diferite și la presiuni diferite. Presupunînd că cele două sisteme au aceeași temperatură $T$, dacă le aducem în contact unul cu altul ele se vor menține în aceeași stare. Nu se va produce transfer de energie sub formă de căldură în nici un sens.

Să presupunem acum că din exterior se produce un transfer de energie sub formă de căldură către cele două sisteme, astfel încît sistemul $A$ va primi căldura $Q_A$ și, în același timp, sistemul $B$ va primi căldura $Q_B$. În condițiile în care sistemele rămîn separate, creșterea entropiei lor este dată de $\frac{Q_A}{T}$ și respectiv $\frac{Q_B}{T}$. Să le unim acum în așa fel încît să formeze un singur sistem compus. În acest caz creșterea totală a entropiei este

$$\frac{Q_A + Q_B}{T}.$$

Cum însă

$$\frac{Q_A + Q_B}{T} = \frac{Q_A}{T} + \frac{Q_B}{T}$$

conchidem că entropia unui sistem compus este egală cu suma entropiilor părților sale componente.



Boltzmann a legat această proprietate a entropiei de probabilitate unei stări și anume de faptul că probabilitatea unui eveniment compus este dată de produsul probabilităților evenimentelor componente. Aceasta înseamnă că între cele două categorii de mărimi trebuie să existe o dependență logaritmică, întrucît, așa cum știm, logaritmul unui produs de numere este egal cu suma logaritmilor numerelor. Relația propusă de Boltzmann este

$$S = k \ln W \qquad (34)$$

(denumită ulterior *relația lui Boltzmann*). $k$ este constanta lui Boltzmann, iar $W$ probabilitatea ca sistemul să existe în starea în care se află față de toate stările posibile în care s-ar putea afla. Relația (34) face legătura între o mărime termodinamică (macroscopică) — entropia $S$ și o mărime statistică (cu caracter microscopic) — probabilitatea $W$.

Relația (34) arată că, la zero absolut, entropia oricărui sistem este egală cu zero. Într-adevăr, la temperatura de zero absolut mișcarea încetează, deci toate moleculele au viteza egală cu zero și, de aceea, probabilitatea termodinamică $W$ este egală cu unitatea. Folosind (34) vom avea

$$S = k \ln 10 \lg W = k \cdot 2{,}0258 \lg 1 = 0.$$

Ludwig *Boltzmann* (1844—1906), fizician și matematician austriac, membru al Academiei de Științe din Viena.

Domeniul preocupărilor sale l-au constituit teoria cinetico-moleculară a căldurii, termodinamica și teoria radiației termice. Cu ajutorul metodelor statistice, Boltzmann a generalizat legile teoriei cinetice a gazelor. Pe cale cinetico-moleculară a contribuit la fundamentarea celui de-al doilea principiu al termodinamicii. A dat demonstrația termodinamică a legii lui Stefan din teoria radiației termice. A mai contribuit la elaborarea legii echipartiției energiei. În fizică este cunoscută constanta lui Boltzmann, $k$.

Din punct de vedere filozofic, Boltzmann a fost adeptul concepției atomiste. Împreună cu alți fizicieni din vremea sa a combătut machismul, precum și energetismul chimistului german W. Ostwald.

**Ludwig Boltzmann**

Boltzmann a demonstrat limpede incompatibilitatea acestor concepții. Pentru Boltzmann însuși lupta a avut un sfîrșit tragic: exasperat de profesorii prusaci din acea vreme, Boltzmann s-a sinucis în anul 1906.

Relația lui Boltzmann este esențială pentru termodinamică. Conform ei, se poate spune că procesele naturale se desfășoară în sensul care conduce la o entropie mai mare, adică în sensul către o stare mai probabilă. *Din punct de vedere termodinamic*, starea de echilibru către care tinde un sistem este starea de *entropie maximă*, iar *din punct de vedere statistic* este *starea cea mai probabilă*. Principiul al doilea al termodinamicii arată sensul cel mai probabil al evenimentelor, nu numai evenimentele posibile. Cu acestea sîntem în stare să înțelegem formularea celui de-al doilea principiu al termodinamicii dată de către Boltzmann:

*„Natura tinde de la stările cele mai puțin probabile spre stările cele mai probabile".*



Domeniul de aplicare a principiului al doilea al termodinamicii este extrem de larg. Acest principiu este considerat ca unul dintre cele mai utile și mai generale principii ale științelor naturii.

*Principiul al treilea al termodinamicii*

Al treilea principiu al termodinamicii a fost formulat mai întîi de către Nernst în anul 1906, și a fost denumit *teorema lui Nernst*, denumire care s-a păstrat mult timp, apoi reformulat de către Planck. Forma actuală a principiului a rezultat din cele două formulări — Nernst și Planck.

Așa cum am văzut, primul principiu face apel la o *mărime fizică de stare — energia* și la *mărimile fizice de proces — lucrul mecanic* și *căldura*. În cel de al doilea principiu al termodinamicii se întîlnește *mărimea fizică de stare* numită *entropie*. În principiul al treilea nu se întîlnesc alte funcții de stare. Importanța lui constă, însă, în aceea că el face ca funcțiile de stare să poată fi determinate numeric și deci utilizabile în practică.

Nernst a stabilit principiul său pe baza generalizării și sistematizării unui bogat material experimental. Principiul lui Nernst se referă la modul cum se comportă entropia unui sistem în vecinătatea temperaturii de zero absolut:

*„În vecinătatea lui zero absolut entropia oricărui sistem este totdeauna constantă"*. Aceasta este formularea principiului lui Nernst și constituie conținutul *principiului al treilea al termodinamicii*. Matematic se exprimă prin relația

$$\lim_{T \to 0} \Delta S = 0.$$

Walther Hermann *Nernst* (1864—1941), fizician și chimist german, profesor universitar la Göttingen și la Berlin. Laureat al Premiului Nobel pentru chimie în anul 1920. În afară de formularea celui de-al treilea principiu al termodinamicii, Nernst a dat teoria osmotică a pilelor electrice. De asemenea, a studiat soluțiile diluate. Are contribuții în fizica aplicată. Este cunoscută lampa lui Nernst. În chimia fizică aportul său este în domeniul termochimiei.

...Se spune că Nernst se ocupa în timpul liber cu o crescătorie de crapi. O persoană, al cărui nume nu se cunoaște, îi spuse, neîntrebat, opinia sa cum că i s-ar fi părut mai interesantă creș-

terea păsărilor. Da, zise Nernst, eu însă mă ocup cu creșterea animalelor care sînt în echilibru termodinamic față de mediul înconjurător. A crește, însă, animale cu sînge cald înseamnă a încălzi cu banii proprii spațiul cosmic.

Am definit la momentul oportun diferența de entropie între două stări oarecare $A$ și $B$ ale unui sistem. Aceasta permite a se interpreta fizic principiul lui Nernst, în sensul că toate stările posibile ale unui sistem au aceeași entropie la temperatura de zero absolut ($T = 0$ K). Așa fiind, este avantajos să se aleagă ca stare de referință $R$ a unui sistem starea acestuia la zero absolut, deoarece permite să se ia egală cu zero entropia stării de referință.

Conform relației (30), entropia unei stări oarecare $A$ a unui sistem este, în acest caz, definită și este dată de

$$S_A = \int_{T=0}^{A} \frac{\delta Q}{T}.$$

Integrala este luată de-a lungul unei transformări reversibile de la o stare oarecare, în care temperatura absolută este egală cu zero, pînă la o altă stare oarecare $A$.

Din relația lui Boltzmann (34) rezultă că entropia unui sistem este nulă ($S = 0$) atunci cînd probabilitatea stării termodinamice a sistemului este egală cu unitatea ($W = 1$). Această concluzie permite să se interpreteze statistic principiul lui Nernst, deci principiul al treilea al termodinamicii. Pentru a înțelege, însă, interpretarea statistică vom face două precizări foarte importante. Un sistem se caracterizează atît prin *stare termodinamică*, cît și prin *stare dinamică*. Starea termodinamică a unui sistem se definește printr-un număr mic de parametri cunoscuți. Acești parametri pot fi, de exemplu, presiunea, volumul, temperatura ș.a. Starea dinamică, însă, este definită dacă se cunosc în mod detaliat poziția și mișcarea tuturor moleculelor ce alcătuiesc sistemul. Aceasta înseamnă că la o aceeași stare termodinamică corespunde un număr mare de stări dinamice. Numărul de stări dinamice care corespund unei aceleiași stări termodinamice reprezintă tocmai *probabilitatea de realizare a stării termodinamice* $W$ și se determină pe baza unor criterii din mecanica statistică.

Acum putem înțelege ceea ce afirmă principiul lui Nernst din punct de vedere al interpretării statistice: *unei stări termodinamice a unui sistem la zero absolut îi corespunde*



*numai o singură stare dinamică și anume starea dinamică cu energia cea mai mică, comparabilă cu structura cristalină dată sau cu starea de agregare a sistemului.* Principiul lui Nernst are valabilitate generală.

Principiul al treilea a fost formulat și de către Planck, afirmînd că *entropia unui sistem tinde către zero atunci cînd temperatura lui absolută tinde către zero.* Vom scrie deci

$$\lim_{T \to 0} S = 0.$$

Această relație precizează că constanta aditivă, care nu este definită în formularea lui Nernst, are valoarea zero. Formularea lui Planck este, însă, mai restrînsă decît formularea lui Nernst.

Principiul al treilea al termodinamicii arată clar imposibilitatea atingerii temperaturii de zero absolut.

Cele două formulări se contopesc într-una singură și constituie *principiul Nernst-Planck: cînd temperatura absolută a unui sistem tinde către zero, entropia sa tinde către o constantă universală, finită, care—pentru sistemele pure condensate—poate fi egală cu zero.*

În ultima vreme, sub această formă este considerată formularea celui de-al treilea principiu al termodinamicii.

Cel de-al treilea principiu al termodinamicii a condus la o serie de concluzii, între care: la zero absolut căldura specifică a corpurilor devine zero; temperatura de zero absolut *nu* poate fi atinsă. Cea de a doua concluzie este considerată de către unii fizicieni (Fowler și Guggenheim) ca o formulare a principiului al treilea al termodinamicii. Concluziile menționate au fost verificate experimental. Principiul al treilea al termodinamicii se aplică mai mult în termodinamica chimică.

*În concluzie:*

*Principiul întîi al termodinamicii* este legat de conceptul de *energie internă*, care este o *funcție de stare*. Acest principiu exprimă, în esență, faptul că *există o funcție termodinamică utilă* numită *energie internă*.

*Principiul al doilea al termodinamicii* este legat de conceptul de *entropie*, care este și ea o *funcție de stare*. În esență, acest principiu exprimă faptul că *există o funcție termodinamică utilă* numită *entropie*.

Dacă introducem $\delta Q$ din (29) în expresia matematică a principiului întîi dat prin relația (17), se obține *ecuația fundamentală a termodinamicii*

$$dU = TdS + \delta L,$$

care reprezintă, în același timp, expresia matematică a principiului al doilea valabil pentru procese reversibile.

*Principiul al treilea al termodinamicii* este legat de cele două funcții de stare, *energia internă* și *entropia*, dînd metodele de determinare numerică a acestora, pentru a putea fi utilizate în practică.

## PRINCIPIUL LUI FERMAT

În studiul fenomenelor optice se întîlnește adesea noțiunea de *drum optic*. De aceea, vom lămuri mai întîi această denumire. În acest scop vom considera un mediu transparent și vom nota cu $n$ indicele de refracție absolut al mediului, iar cu $s$ lungimea geometrică a drumului parcurs de lumină în mediul respectiv. Prin definiție, produsul $ns = l$ se numește *drum optic*. Substituind pe $n$, se obține

$$\frac{c}{v}s = l, \text{ de unde } \frac{s}{v} = \frac{l}{c}.$$

Observînd că timpul în care lumina străbate drumul geometric $s$ într-un mediu oarecare este egal cu timpul în care lumina ar străbate drumul $l$ în vid, putem conchide că *drumul optic reprezintă lungimea spațiului* l *pe care l-ar parcurge lumina în vid, într-un timp egal cu timpul necesar luminii ca să parcurgă, în mediul dat, lungimea spațiului* s *cu viteza* v.

Într-un mediu eterogen vom scrie

$$l = \int_A^B n\,ds.$$

În anul 1665, Fermat enunță următorul principiu, care stă la baza opticii geometrice: *drumul optic al razelor de lumină între două puncte este determinat de condiția ca timpul de propagare să fie minim.*



Însă timpului minim îi corespunde un drum optic minim și, de aceea, putem scrie

$$\left.\begin{aligned} t = \int_A^B dt \to \text{minim} \quad \text{sau} \quad \frac{l}{c} = \int_A^B \frac{ds}{v} \to \text{minim} \\ \text{de unde } l = \int_A^B n\,ds \to \text{minim} \end{aligned}\right\} \quad (35)$$

deoarece, $c = \text{const.}$ și $\frac{c}{v} = n$.

În medii omogene din punct de vedere optic, principiul lui Fermat este în concordanță cu prima lege fundamentală a opticii, deoarece în medii omogene și izotrope linia dreaptă este drumul cel mai scurt între două puncte.

În anumite condiții, între două puncte s-ar putea propaga mai multe raze de lumină. Cum timpul de propagare trebuie să fie minim întotdeauna, drumurile optice trebuie să aibă aceeași lungime; cu alte cuvinte, drumul optic urmat de lumină este *staționar*. În alte cazuri drumul optic poate fi *maxim*. Ținînd seama de aceasta, principiul lui Fermat devine general și relațiile (35) se scriu

$$t = \int_A^B dt \to \textit{extrem} \quad \text{sau} \quad l = \int_A^B n\,ds \to \textit{extrem}.$$

Pierre de *Fermat*, matematician francez care a trăit între anii 1601—1665. În matematică — în teoria numerelor — a enunțat o teoremă, iar în optică un principiu, ambele purtîndu-i numele. Lui Fermat i se datorește prima aplicare a calculului cu cantități diferențiale pentru găsirea tangentelor. Laplace spunea că „Fermat împarte cu Blaise Pascal onoarea descoperirii calculului probabilităților."

Fermat afirma că lumina este economică. Principiul formulat de el este echivalent cu legile de reflexie și refracție și deci s-ar putea construi o optică geometrică cu acest principiu. O consecință directă a principiului lui Fermat o constituie *teorema lui Malus* (vezi p. 102—104) și *principiul reversibilității drumului optic al razelor de lumină.*

*Legea reflexiei luminii dedusă cu ajutorul principiului lui Fermat.* Fie $A$ și $B$ două puncte într-un plan $P$, normal

pe planul unei oglinzi $O$ (fig. 18). Să notăm cu $I_1$ un punct oarecare în planul $O$ și cu $I$ piciorul perpendicularei coborîte din $I_1$ pe urma $\Delta$ a planului $P$. Unghiurile $AII_1$ și $BII_1$ fiind drepte, rezultă că

$$\begin{gathered} AI < AI_1 \\ BI < BI_1 \\ \hline AI + BI < AI_1 + BI_1 \end{gathered}$$

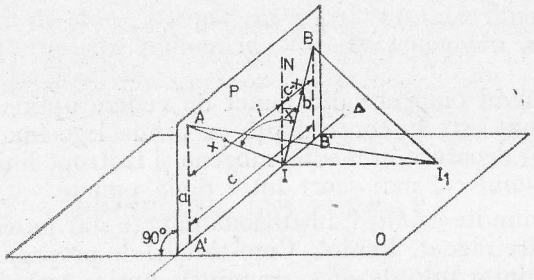



Fig. 18. Pentru explicarea legii reflexiei luminii cu ajutorul principiului lui Fermat.

Prin urmare, pentru orice punct $I_1$ luat în planul $O$, drumul $AI_1B$ este mai lung decît drumul $AIB$. Rezultă că, dacă în $A$ ar fi o sursă luminoasă punctuală, raza de lumină ar trebui să urmeze drumul $AIB$ pentru a ajunge din $A$ în $B$. De aici conchidem că raza incidentă, raza reflectată și normala în punctul de incidență ($I$) trebuie să fie în același plan, adică cele două plane, de incidență și de reflexie, sînt confundate. Dar condiția de extremum cere ca derivata întîi a funcției să fie nulă și deci, aplicînd principiul lui Fermat, vom scrie

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}(AI + IB)\frac{1}{v} = 0$$

sau

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left(\sqrt{a^2 + x^2} + \sqrt{b^2 + (c - x^2)}\right)\frac{1}{v} = 0$$

de unde

$$\frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{c - x}{\sqrt{b^2 + (c - x)^2}} = 0 \qquad (36)$$

și

$$\sin i - \sin(-r) = 0, \Rightarrow i = -r.$$



Am demonstrat deci, aplicînd principiul lui Fermat, că cele două unghiuri, de incidență $i$ și de reflexie $r$, sînt egale. Semnul derivatei a doua a expresiei (36) arată imediat că drumul $AIB$ este într-adevăr minim.

*Legea refracției luminii dedusă cu ajutorul principiului lui Fermat.* Să considerăm două medii transparente, omogene și izotrope, avînd indici de refracție diferiți, mediile fiind separate de planul $S$ (fig. 19).

Fie două puncte $A$ și $B$ într-un plan $P$, perpendicular pe $S$ și să notăm cu $I_1$ un punct oarecare în planul $S$. Se vede că

$$AI < AI_1 \text{ și } IB < I_1B$$

și deci

$$AI + IB < AI_1 + I_1B.$$

Așadar, pentru orice punct $I_1$ de pe planul $S$, drumul $AI_1B$ este mai lung decît drumul $AIB$; $I$ este proiecția lui $I_1$ pe urma $\Delta$ a planului $P$, în planul $S$. Reiese de

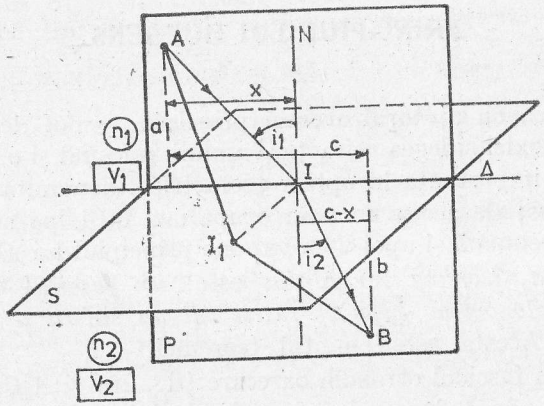



Fig. 19. Pentru explicarea legii refracției luminii cu ajutorul principiului lui Fermat.

aici că dacă în $A$ ar fi o sursă luminoasă punctuală, o rază de lumină ar ajunge în $B$ după drumul $AIB$. Înseamnă că cele două raze, incidentă și refractată, împreună cu normala în punctul de incidență, trebuie să se găsească în același plan.

După principiul lui Fermat, timpul de propagare între $A$ și $B$ este minim și, de aceea, vom scrie

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left(\frac{AI}{v_1}+\frac{IB}{v_2}\right)=0$$

sau

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left(\frac{\sqrt{a^2+x^2}}{v_1}+\frac{\sqrt{b^2+(c-x)^2}}{v_2}\right)=0. \qquad (37)$$

Și aici semnul derivatei a doua a expresiei (37) arată că drumul $AIB$ este minim. Din (37) rezultă

$$\frac{v_1}{v_2}=\frac{\sin i_1}{\sin i_2}=\frac{n_2}{n_1} \text{ sau } n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2.$$

Legea refracției este astfel demonstrată.

## PRINCIPIUL LUI HUYGENS

Fiindcă cu ajutorul acestui principiu se pot demonstra legea reflexiei și legea refracției luminii, folosind și o teoremă de mare importanță în optica geometrică, denumită *teorema lui Malus*; de aceea ne vom ocupa mai întîi, pe scurt, de această teoremă și apoi vom expune principiul lui Huygens.

Așadar, *teorema lui Malus* este: *un fascicul ortonom*[1] *rămîne ortonom și după ce razele lui au suferit refracții și reflexii.* Acesta este enunțul teoremei.

Fie un fascicul ortonom oarecare (fig. 20) și $A_1C_1D_1B_1$ și $A_2C_2D_2B_2$ două drumuri geometrice infinit vecine. Punctele $A_1$ și $A_2$ au fost luate pe aceeași suprafață ortogonală cu sistemul de raze. Punctele $B_1$ și $B_2$ au fost astfel luate

[1] Fasciculele de raze de lumină care admit în fiecare punct suprafețe perpendiculare pe raze se numesc *ortonome*, iar suprafețele respective se numesc *suprafețe de timp de propagare constant*. Exemple de fascicule ortonome: fasciculele *telecentrice* (care au un punct comun la infinit) și fasciculele *homocentrice* (care converg într-un același punct sau diverg de la o sursă de lumină punctuală).



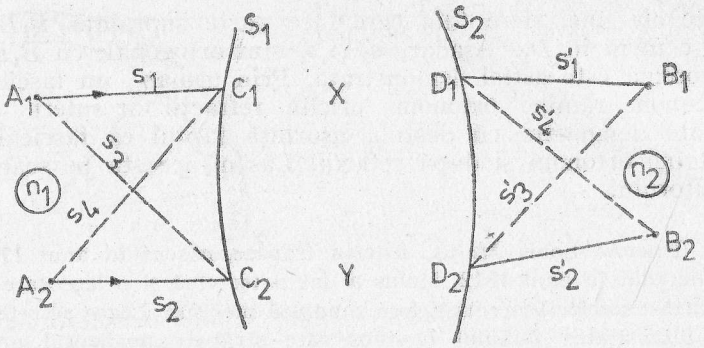



Fig. 20. Pentru demonstrarea teoremei lui Malus.

încît drumurile optice $(A_1C_1D_1B_1)$ și $(A_2C_2D_2B_2)$ să fie egale. Avem

$$n_1s_1 + X + n_2s_1' = n_1s_2 + Y + n_2s_2' \qquad (38)$$

unde cu $X$ și $Y$ am notat cele două drumuri optice între suprafețele $S_1$ și $S_2$. Întrucît drumurile geometrice urmate de lumină sînt drumurile optice minime, putem scrie

$$n_1s_1 + X + n_2s_1' = n_1s_3 + Y + n_2s_3' \qquad (39)$$

Scăzînd membru cu membru relațiile (38) și (39), obținem

$$0 = n_1(s_2 - s_3) + n_2(s_2' - s_3').$$

Dar, fiindcă $A_1$ și $A_2$ se găsesc, ca puncte infinit vecine, pe o aceeași suprafață ortogonală cu sistemul de raze, putem considera $s_2 = s_3$ și atunci se obține $s_2' = s_3'$. Cum $B_1$ și $B_2$ sînt infinit vecine, ținînd cont și de ultima egalitate, rezultă că $B_1B_2 \perp s_2'$. De aici reiese că $s_2'$ și $s_3'$ sînt raze ale unei sfere (din care face parte suprafața $B_1B_2$) cu centrul în $D_2$.

Pe de altă parte avem

$$n_1s_2 + Y + n_2s_2' = n_1s_4 + X + n_2s_4'$$

și, ținînd seama de (38), obținem

$$n_1(s_4 - s_1) + n_2(s_1' - s_4') = 0.$$

Dar $s_4 = s_1$, ca drumuri infinit vecine. Rezultă că $s_4' = s_1'$ și deci $B_1B_2 \perp s_1'$. Urmează de aici că $s_1'$ și $s_4'$ reprezintă

aze ale unei sfere (din care face parte suprafața $B_1B_2$), cu centrul în $D_1$. Așadar, $s_2'$ și $s_1'$ sînt ortogonale cu $B_1B_2$. Teorema este astfel demonstrată. Prin urmare, un fascicul ortonom rămîne ortonom, oricîte refracții ar suferi. Se poate demonstra cu destulă ușurință faptul că fasciculul rămîne ortonom și după reflexii. Lăsăm aceasta pe seama cititorului.

Etienne Louis *Malus*, fizician francez, născut în anul 1775 și decedat în anul 1812. Malus a dat o teoremă și o lege care îi poartă numele. Teorema a fost enunțată mai sus. Legea se referă la intensitatea fluxului luminos care străbate analizorul unui ansamblu de polaroizi (polarizor-analizor) și are forma $I = I_0 \cos^2 0$, în care $I_0$ este intensitatea luminii ce a străbătut analizorul cînd $0 = 0$, $0$ fiind unghiul dintre planele principale ale polarizorului și analizorului.

*Formularea principiului lui Huygens.* Lumina, fiind o formă specială de existență a materiei în mișcare, *transportă energie.* De la o sursă lumina se răspîndește în mediile transparente după toate direcțiile. Cînd lumina se propagă printr-un mediu transparent, acesta în întregime intră în oscilație. *Starea* aceasta *de oscilație a întregului mediu reprezintă propagarea oscilațiilor luminoase,* propagare care se face sub formă de *unde.* Direcțiile de propagare a undelor luminoase reprezintă *razele de lumină.*

Cînd mediul prin care se propagă lumina are aceleași proprietăți fizice, deci și același indice de refracție, în toate elementele sale de volum, se spune că este *omogen.* Dacă proprietățile fizice sînt identice după toate direcțiile în fiecare element de volum, atunci mediul este *izotrop.*

Locul geometric al punctelor care oscilează în fază, după un același interval de timp de la începutul propagării oscilațiilor luminoase, emise de sursa de lumină, poartă denumirea de *suprafață de undă.* Există o infinitate de suprafețe de undă. Cea mai avansată suprafață este numită *front de undă.* În medii omogene și izotrope, suprafețele de undă sînt sfere *concentrice,* centrate pe sursa luminoasă. La distanțe foarte mari de sursa luminoasă, o porțiune mică dintr-o suprafață de undă sau din frontul de undă poate fi asimilată cu un plan și se numește *undă plană. Fiecare punct al frontului de undă* $\Sigma$ *este el însuși o nouă sursă de unde secundare,*



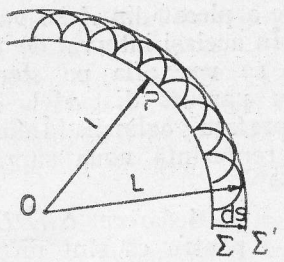



Fig. 21. Pentru explicarea principiului lui Huygens.

*iar înfășurătoarea tuturor undelor secundare reprezintă noul front de undă* (fig. 21).

Acesta este principiul lui Huygens. Pentru fiecare punct de pe suprafața de undă $\Sigma$, drumul optic are valoare constantă

$$l = \int_A^B n \, ds = \text{const.}$$

Între cele două poziții $\Sigma$ și $\Sigma'$ ale frontului de undă, razele luminoase urmează drumul cel mai scurt și deci drumurile optice parcurse de lumină sînt normale pe $\Sigma$ și $\Sigma'$.

*Reflexia luminii explicată cu ajutorul teoremei lui Malus și a principiului lui Huygens.* Fie o undă plană ce întîlnește o suprafață reflectantă, a cărei urmă în planul figurii este dreapta cu hașuri $MM'$ (fig. 22).

În acord cu principiul lui Huygens, fiecare punct al oglinzii se va confunda cu un punct de pe $\Sigma$ și va deveni, astfel, o nouă sursă de unde secundare, atunci cînd punctele de pe suprafața de undă plană vor întîlni oglinda. Așa fiind, înseamnă că în timp ce punctul $D$ de pe unda plană va

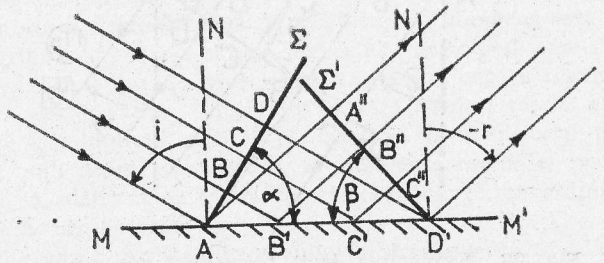



Fig. 22. Legea reflexiei luminii explicată cu ajutorul teoreme lui Malus și a principiului lui Huygens.

străbate distanța $DD'$, unda care a plecat din $A$ se va găsi pe o sferă de rază $AA'' = DD'$. În același interval de timp, undele care au plecat din $B, C$ se vor afla pe sfere cu razele $B'B''$, $C'C''$, după ce au parcurs distanțele $BB'$, $CC'$, pentru a ajunge la suprafața oglinzii. Înfășurătoarea acestor unde secundare reprezintă noua suprafață de undă și anume unda reflectată.

De pe figură se vede că $\alpha = \beta$, deoarece $\Delta ADD' = \Delta AA''D'$, iar $\alpha = i$ și $\beta = -r$ pentru că sînt unghiuri cu laturi perpendiculare (sau unghiuri avînd același complement). Rezultă $i = -r$ și deci a doua parte a legii reflexiei este demonstrată.

*Refracția luminii explicată cu ajutorul teoremei lui Malus și a principiului lui Huygens.* Să considerăm două medii adiacente, transparente, omogene și izotrope, avînd indicii de refracție absoluți $n_1$ și $n_2$; să presupunem că $n_2 > n_1$ (fig. 23). Fie $MM'$ urma în planul figurii a suprafeței ce separă cele două medii. Fiecare punct al acestei suprafețe va deveni o nouă sursă de unde secundare atunci cînd punctele de pe suprafața de undă vor veni în contact cu suprafața de separare (cu dioptrul plan). Așa fiind, se poate spune că, în timp ce punctul $E$ parcurge distanța $EE'$, unda

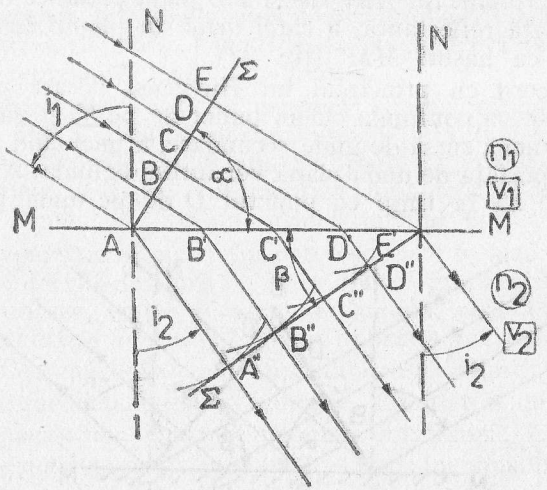



Fig. 23. Explicarea legii refracției luminii cu ajutorul teoremei lui Malus și a principiului lui Huygens.



care pleacă din $A$ va ajunge pe o sferă cu rază $AA'$; unda care pleacă din $B'$ va ajunge pe o sferă de rază $B'B''$ ș.a.m.d. Înfășurătoarea acestor unde secundare reprezintă unda refractată. Pe figura 23 se vede că $\alpha = i_1$ și $\beta = i_2$; ținînd seama și de cele arătate mai sus, putem scrie

$$EE' = AE' \sin i_1 = v_1 t$$

$$AA' = AE' \sin i_2 = v_2 t$$

unde cu $t$ am notat timpul necesar ca unda luminoasă ce pleacă din $E$ să ajungă în $E'$, iar cu $v_1$ și $v_2$ vitezele de propagare a luminii în cele două medii. Rezultă

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1}.$$

De aici,

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2,$$

relație ce reprezintă *invariantul Snellius-Descartes*. Acest rezultat este în dezacord cu teoria corpusculară a lui Newton, după care $v_1/v_2 = n_1/n_2$, dar în acord cu teoria ondulatorie. Prin urmare, experiențele au confirmat valabilitatea relației Snellius-Descartes.

În concluzie, fenomenele de reflexie și de refracție se produc în acord cu legea stabilită experimental de către Snellius și, independent, de către Descartes, lege care rezultă fie din principiul lui Fermat, fie din cel al lui Huygens.

Christian *Huygens* (1629—1695), fizician, geometru și astronom olandez. A fost membru al Academiei de Științe din Paris și membru al Societății Regale din Londra. Huygens este autorul cercetărilor asupra refracției, elaborînd principiul care-i poartă numele. A inventat resortul elastic în spirală pentru regularizarea mișcării ceasornicelor. Tot Huygens este autorul teoriei clasice a mișcării pendulului, arătînd că oscilația oricărui corp poate fi redusă, sub aspect matematic, la problema oscilației pendulului simplu. A elaborat și teoria forțelor centrifuge, pregătind astfel mecanica lui Newton.

Huygens a explicat fenomenul de birefringență (dublă refracție) cu ajutorul concepției sale ondulatorii asupra luminii. A elaborat prima lucrare științifică de calculul probabilităților, iar

Christian Huygens

în anul 1657 a descoperit cel mai mare satelit al lui Saturn, satelit ce a primit numele de Titan. De asemenea Huygens a indicat forma inelului care înconjoară planeta Saturn. A scris *Tratat despre lumină*, *Dioptrica* și altele.

Din legea refracției luminii (invariantul Snellius-Descartes) rezultă imediat legea reflexiei, dacă punem $n_2 = -n_1$

$$i_1 = -i_2.$$

semnul minus ne spune că unghiurile sînt măsurate, de la normala în punctul de incidență, în sensuri opuse. Din cele arătate aici rezultă că reflexia luminii este un caz particular al refracției luminii.

## PRINCIPIUL HUYGENS-FRESNEL

Augustin Jean *Fresnel* (1788—1827), fizician francez. A fost membru al Academiei de Științe din Paris. Fresnel provenea dintr-o familie de intelectuali. Tatăl său era arhitect. Din anul 1804 a urmat cursurile Școlii Politehnice, pe care a absolvit-o



obținînd diploma de inginer de poduri, lucrînd în specialitate pînă în 1814. În anul 1814, din cauza unei răzvrătiri împotriva lui Napoleon Bonaparte, a fost destituit din postul de inginer. După acest eveniment, Fresnel se consacră fizicii.

În ziua de 28 decembrie, același an, Fresnel scrie unui prieten următoarele: „Nu știu ce se înțelege prin polarizarea luminii; roagă-l pe unchiul meu M. Mérimé să-mi trimită lucrările din care aș putea să mă lămuresc". Într-adevăr, s-a lămurit bine, deoarece numai după 8 luni a făcut descoperiri în acest domeniu. Descoperiri are și în domeniul *difracției luminii*; aceasta i-a adus, în 1819, premiul Academiei de Științe din Paris. Patru ani mai tîrziu a fost primit membru al Academiei de Științe din Paris. După alți doi ani este primit în rîndul membrilor Societății Regale din Londra. În fine, după încă doi ani (1827) Societatea Regală i-a decernat Medalia Rumford.

Fresnel a completat principiul lui Huygens cu noțiunea de interferență, formulînd un principiu nou care stă la baza opticii și cunoscut azi sub denumirea de *principiul Huygens-Fresnel*.

Împreună cu Arago a studiat fenomene legate de polarizarea luminii. De pildă, a studiat fenomenul de interferență a luminii polarizate, a explicat fenomenul de polarizare rotatorie, ajungînd în cele din urmă la concluzia că lumina este o undă transversală. Această concluzie a contribuit la înlăturarea ipoteticului mediu cosmic — eterul și a scos din impas teoria ondulatorie a luminii, fiind confirmată mai tîrziu de teoria electromagnetică a luminii (este vorba de transversalitatea undelor luminoase) elaborată de către Maxwell.

Fresnel a avut o viață scurtă. În pofida acestui fapt, numele său a rămas legat de cercetările pe care le-a făcut, precum și de o serie de dispozitive și instalații ce-i aparțin. Între acestea menționăm: formulele lui Fresnel, biprisma Fresnel, oglinzile lui Fresnel ș.a.

Pentru a facilita înțelegerea principiului Huygens-Fresnel, principiu fundamental în optică și folosit în studiul fenomenelor de difracție a luminii și în holografie, este absolut necesar să prezentăm succint unele probleme de bază privind fenomenul de interferență a undelor luminoase. Vom considera numai unde luminoase monocromatice, deoarece fenomenele sînt mai ușor de înțeles în felul acesta.

Lumina este o undă electromagnetică în care cei doi vectori, cîmp electric $\vec{E}$ și inducție magnetică $\vec{B}$, oscilează

în plane perpendiculare între ele. Efecte luminoase se produc numai datorită vectorului $\vec{E}$ și, de aceea, el este numit și *vector luminos*.

Undele luminoase sînt emise de către atomii excitați din sursele de lumină. Emisia are loc discontinuu, sub forma unor trenuri de unde, a căror lungime este limitată. Lungimea unui tren de unde este numită *lungime de interferență*. Pentru lumina filtrată, un tren de unde poate consta din cîteva zeci de lungimi de undă. Lămpile de sodiu în care se folosește un arc electric între electrozi de sodiu dau, însă, trenuri de unde care conțin cîteva mii de milioane de lungimi de undă. Lungimea de interferență poate avea valori de la 1 mm pînă la 1 m.

Undele luminoase pot fi *necoerente* sau *coerente*. În primul caz, diferența de fază între undele emise de două surse variază la întîmplare, în timp ce în al doilea caz diferența de fază între unde este constantă.

Experiența arată că iluminarea rezultantă produsă de mai multe surse de lumină pe o suprafață este egală cu suma iluminărilor produse de fiecare sursă. Pe de altă parte, însă, se poate demonstra că iluminarea este proporțională cu pătratul amplitudinii. În cazul undelor coerente, iluminarea rezultantă produsă pe o suprafață diferă în general de suma iluminărilor produse de undele componente, putînd fi mai mare sau mai mică. Aceasta se datorește faptului că oscilațiile luminoase nu sînt pur armonice și ele nu durează un timp nelimitat. Ele se întrerup și reapar, după scurt timp, însă cu altă fază inițială. *Oscilațiile luminoase sînt o succesiune foarte rapidă de trenuri de unde cu faze inițiale diferite, la întîmplare.*

Prin întîlnirea și compunerea undelor luminoase coerente se poate obține deci, în anumite condiții, o iluminare mult mai mare decît prin compunerea undelor necoerente cu aceeași amplitudine, dar se poate obține și întunecare completă, iluminare nulă. Acest fenomen se numește *interferența undelor*.

Undele coerente pot interfera dacă direcțiile lor de oscilație coincid. Rezultatul interferenței depinde de amplitudinea undelor, de diferența fazelor undelor care interferă, adică de diferența de fază inițială a surselor de lumină și de diferența de drum optic. Practic, diferența de fază inițială este totdeauna nulă. Să explicăm cele afirmate mai sus.



Fie două surse de lumină punctuale, $S_1$ și $S_2$ (fig. 24), care emit unde luminoase de aceeași amplitudine, de aceeași frecvență, în fază, coerente, și un punct $M$ depărtat de aceste surse, astfel ca $S_1S_2 \ll OM$. Dreapta $OO'$ este perpendiculară pe mijlocul segmentului $S_1S_2$. Cu o deschidere de compas cît $d_1$ se descrie un arc de cerc cu centrul în $M$.

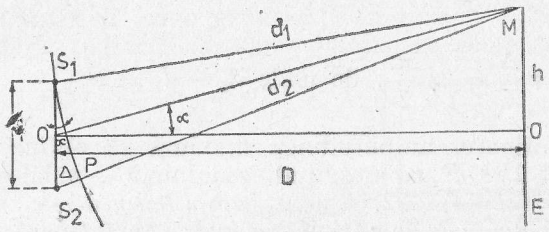



Fig. 24. Pentru determinarea poziției franjelor luminate și întunecate în funcție de diferența de drum optic.

Diferența de drum optic între undele ce interferă este $\Delta$. Cum am admis că $D \gg l$, rezultă că $S_1P$ se poate aproxima cu o dreaptă și deci $\Delta S_2S_1P \sim \Delta MOO'$. În $M$ se întîlnesc undele provenind de la ambele surse. Ecuațiile acestor unde se scriu

$$y_1 = a \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d_1}{\lambda}\right) \tag{40}$$

$$y_2 = a \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d_2}{\lambda}\right). \tag{41}$$

În punctul $M$ undele au practic aceeași direcție și prin compunere dau o undă rezultantă

$$y = y_1 + y_2 = 2a \cos \left(\pi \frac{d_2 - d_1}{\lambda}\right) \cdot \cos \pi \left(\frac{2t}{T} - \frac{d_2 + d_1}{\lambda}\right).$$

Amplitudinea acestei unde este

$$A = 2a \cos \pi \frac{d_2 - d_1}{\lambda}. \tag{42}$$

Undele din (40) și (41) fiind coerente, amplitudinea undei rezultante $A$ depinde numai de drumurile optice $d_1$ și $d_2$. Să notăm cu $\psi$ argumentul cosinusului din relația (42).

Dacă $\psi = (2k+1)\cdot\pi/2$, unde $k$ este un număr întreg oarecare, amplitudinea este nulă; dacă $\psi = 2k\cdot\pi/2 = k\pi$, amplitudinea este maximă și egală cu $2a$.

Ținînd seama de acestea vom scrie

$$\pi\frac{d_2-d_1}{\lambda} = (2k+1)\frac{\pi}{2}, \quad \text{de unde} \quad d_2-d_1 = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

și

$$\pi\frac{\Delta}{\lambda} = 2k\frac{\pi}{2}, \quad \text{de unde} \quad d_2-d_1 = 2k\frac{\lambda}{2}.$$

Prin urmare, amplitudinea maximă se obține pentru $d_2-d_1 = 2k\cdot\lambda/2$, iar amplitudinea minimă — nulă — pentru $d_2-d_1 = (2k+1)\cdot\lambda/2$. Așadar, *amplitudinea este maximă cînd diferența de drum optic între undele ce interferă este un număr par de semilungimi de undă și minimă cînd diferența de drum optic este un număr impar de semilungimi de undă.*

Locul geometric al punctelor din spațiu, pentru care amplitudinea are aceeași valoare, satisface condiția: $(d_2-d_1)/\lambda = \text{const.}$, ecuație care reprezintă un hiperboloid de rotație, cu focarele în $S_1$ și $S_2$ avînd ca axă de rotație dreapta $S_1S_2$. În figura 25 se dă secțiunea unora dintre hiperboloizi corespunzători unor valori date pentru $d_2-d_1$, cu un plan care conține axa de rotație. Pentru diferite valori ale diferenței $d_2-d_1$ se obține o familie de hiperboloizi luminoși alternînd cu hiperboloizi întunecoși. Prin inter-

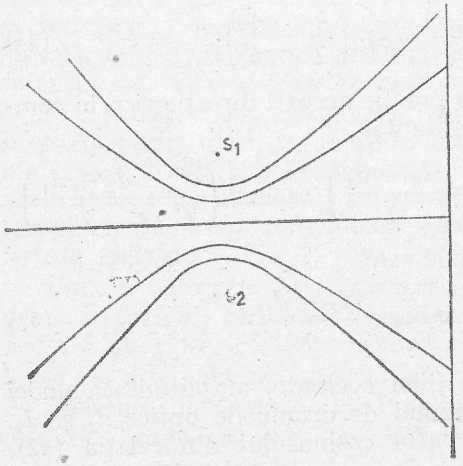



Fig. 25. Franjele de interferență (hiperboloizi de revoluție).



punerea unui ecran care trece prin $M'O'$ se obțin așa-numitele *franje de interferență*, benzi alternativ luminate și întunecate.

Surse de lumină coerente se pot obține în două moduri, așa cum a stabilit Fresnel în anul 1818:

— prin formarea a două imagini ale aceleiași surse de lumină;

— prin folosirea sursei și a unei imagini a sa.

Dăm mai jos o experiență în care se folosește primul mod de obținere de surse luminoase coerente.

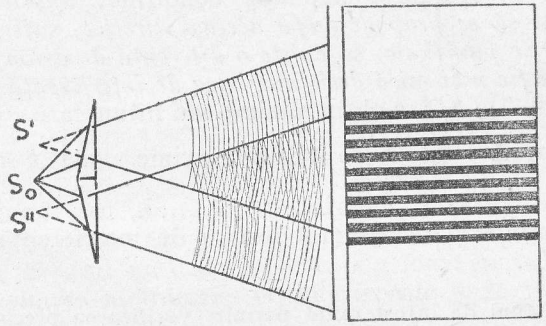



Fig. 26. Biprisma lui Fresnel.

În figura 26 se arată una dintre experiențele lui Fresnel, în care s-au folosit două prisme avînd bazele lipite — *biprisma lui Fresnel*. Unghiul $\beta$ este de aproape 180°, unghiul $\alpha$ fiind de circa 30′. Sursa de lumină este o fantă îngustă luminată, $S_0$, paralelă cu muchia $m$. $S_0$ fiind plasată la o distanță mică față de biprismă, razele emergente sînt ușor divergente, obținîndu-se două imagini virtuale. Imaginile virtuale ale lui $S_0$($S'$ și $S''$) pot fi considerate ca surse de lumină coerente. Franja centrală ($k=0$) este luminată. Interferența se produce între undele emise de o aceeași sursă de lumină.

Undele coerente pot interfera *constructiv* sau *distructiv*. În primul caz, undele trebuie să fie *în fază* și deci amplitudinea rezultantă este mai mare decît amplitudinea uneia dintre ele. În cel de-al doilea caz, undele trebuie să fie *în opoziție de fază* și deci amplitudinea rezultantă este mai mică decît amplitudinea uneia dintre unde. Dacă amplitudinile undelor ce interferă sînt egale, amplitudinea rezultantă în primul caz este egală cu dublul amplitudinii uneia dintre unde, iar în al doilea caz amplitudinea rezultantă este nulă. Aceasta explică nedumerirea lui Grimaldi, care

observase experimental că prin compunerea luminii rezultă și iluminare nulă, adică

lumină + lumină = întuneric

și deci trebuie admise proprietățile ondulatorii ale luminii.

În concluzie, prin interferența luminii înțelegem *fenomenul de întîlnire și compunere a undelor luminoase, dînd naștere în cîmpul de interferență la franje alternativ luminate și întunecate*. Pentru ca fenomenul să poată avea loc și să fie observat trebuie îndeplinite condițiile: *undele să fie coerente* și *să se propage după aceeași direcție, sursele luminoase să fie punctuale, să existe o diferență de drum optic și aceasta să fie mai mică decît lungimea de interferență*. Pentru $\Delta = (2k + 1) \cdot \lambda/2$ se obțin minime sau întunecare completă, iar pentru $\Delta = 2k\frac{\lambda}{2}$ se obțin maxime. Aici $k$ este un număr întreg; el ia valorile 0, 1, 2, ..., $n$, este numit *ordin de interferență* și dă ordinul franjei de interferență ($\Delta = d_2 - d_1$).

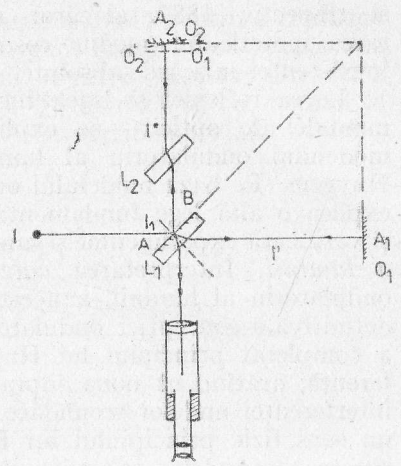
Fenomenul de interferență permite verificarea precisă a planeității suprafețelor. Interferența luminii stă la baza noului domeniu al opticii, optica peliculelor subțiri (optica albastră)[1]. Peliculele sînt din sulfură de zinc sau fluorură de magneziu avînd grosimi între $10^{-4}$ mm și $10^{-3}$ mm și se obțin prin depunerea pe plăci de sticlă sau pe alte corpuri, în aparate cu vid. De obicei, se suprapun mai multe astfel de pelicule, fiecare avînd altă grosime și alt indice de refracție, deci și funcțiuni deosebite. Peliculele subțiri se aplică pe anumite piese optice ale instrumentelor optice, de pildă pe obiectivele aparatelor de fotografiat, reducîndu-se astfel pierderile de lumină. Se pot construi „filtre interferențiale", combinînd pelicule subțiri transparente cu pelicule subțiri semitransparente. Astfel de filtre permit trecerea numai a anumitor culori. Aceasta a făcut să se construiască „geamuri anticalorice", care permit să treacă numai radiațiile vizibile din spectru, radiațiile calorice fiind reflectate. În acest fel se pot ilumina obiecte fără a fi încălzite. De asemenea, se pot construi geamuri care transmit radiațiile infraroșii și reflectă pe cele vizibile.

Pe baza fenomenului de interferență se poate explica jocul de culori (irizațiile) pe baloanele de săpun, pe aripile unor insecte, culorile petelor de ulei sau petrol de pe suprafața apei, colorațiile care se observă la călirea uneltelor din oțel.

[1] Vezi articolul „Optica albastră" de Gh. Hușanu din Buletinul de fizică și chimie, anul I, vol. I, 1977, p. 39–46.



Fig. 27. Interferometrul lui Michelson.




*Interferometrul lui Michelson*. Interferometrul lui Michelson (fig. 27) este un instrument care a jucat un rol deosebit în dezvoltarea metrologiei de interferență și în teoria relativității.

Mersul razelor se vede pe figură. În punctul $I_1$, raza $1$ se refractă și se reflectă luînd astfel naștere razele $1'$ și $1''$. Acestea ajung în $O_1$ respectiv în $O_2$, unde se reflectă întorcîndu-se pe același drum. Figura de interferență este observată cu ajutorul lunetei. Raza $1''$ străbate lama $L_2$, identică cu $L_1$ și care joacă rol de lamă compensatoare. Fața $AB$ a lamei $L_1$ dă pentru $O_1$ imaginea $O'_1$. Între această imagine și $O_2$ se formează o peliculă de aer, de forma unei lame cu fețele plane și paralele sau a unei pene, după cum planul oglinzii $O_2$ este riguros perpendicular pe planul oglinzii $O_1$ sau ușor înclinat. Diferențele de drum se pot calcula cu această pană virtuală. În primul caz se observă franje sub forma unor inele concentrice alternativ luminate și întunecate, iar în al doilea caz franje sub forma unor benzi paralele între ele, alternativ luminate și întunecate.

Interferometrul Michelson a fost folosit pentru compararea metrului etalon cu lungimea de undă a radiației roșii a vaporilor de cadmiu, $\lambda = 6\,438$ Å. Dar mai important este faptul că acest interferometru a avut un rol decisiv în elaborarea bazelor teoriei relativității de către A. Einstein. Astfel, Michelson și ulterior Michelson și Morley au făcut — după cum am văzut — celebrele experiențe din anul 1881

și respectiv 1887, al căror rezultat a condus la înlăturarea ipoteticului mediu cosmic „eterul" și la concluzia inexistenței mișcării absolute.

Legea reflexiei și legea refracției luminii — legi fundamentale ale opticii — se explică foarte bine cu ajutorul modelului ondulatoriu al luminii folosind principiul lui Huygens. Pe baza modelului ondulatoriu, însă, nu se putea explica o altă lege fundamentală a opticii, bine cunoscută și verificată experimental și anume *legea propagării rectilinii a luminii*. Interpretarea corectă, cu ajutorul modelului ondulatoriu al luminii, a acestei legi, a constituit victoria definitivă a concepției ondulatorii. Pentru aceasta, Fresnel a completat principiul lui Huygens cu noțiunea de interferență, arătînd că noua suprafață de undă este rezultatul interferenței undelor secundare. În acest fel, Fresnel a dat un sens fizic principiului lui Huygens arătînd de ce înfășurătoarea undelor secundare are o intensitate apreciabilă. Mai mult, Fresnel a considerat că fiecare punct în care a ajuns perturbația luminoasă reprezintă la rîndul său o sursă, care emite o undă cu aceeași frecvență, aceeași amplitudine și aceeași fază ca și perturbația ajunsă în acel punct. Fresnel nu numai că a completat principiul lui Huygens, dar i-a dat și o nouă formulare.

Fie o sursă de lumină $I$ care se află în interiorul unei suprafețe închise $\Sigma$ (fig. 28); în punctul $P$, exterior suprafeței, intensitatea luminoasă, la un moment dat, poate fi calculată considerînd fiecare punct $M$ al suprafeței ca o sursă virtuală de lumină, cu faza și amplitudinea egală cu acelea ale excitației luminoase sosite din $I$. Prin urmare, *într-un punct exterior suprafeței, acțiunea sursei S este rezultatul interferenței undelor secundare emise de sursele virtuale de pe suprafața* $\Sigma$. Această formulare constituie *principiul Huygens-Fresnel*, care este un principiu fundametal în optică.

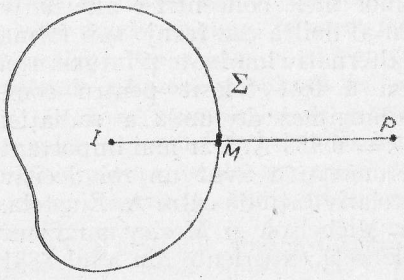



Fig. 28. Pentru înțelegerea principiului Huygens-Fresnel.



Prima problemă care trebuia rezolvată pentru a confirma valabilitatea principiului Huygens-Fresnel era explicarea propagării rectilinii a luminii. Pentru aceasta, Fresnel a considerat o suprafață sferică $\Sigma$ de rază $a$, cu centrul în sursa punctuală $I$ (fig. 29). A împărțit suprafața în zone,

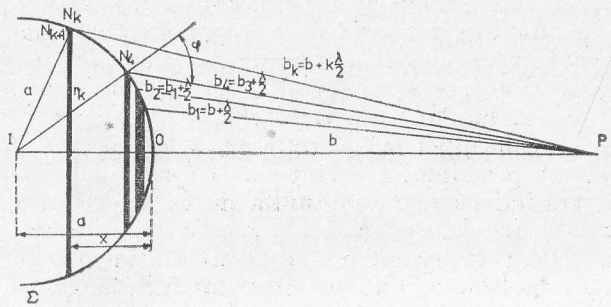



Fig. 29. Pentru demonstrarea propagării rectilinii a luminii cu ajutorul principiului Huygens-Fresnel.

numite ulterior *zone Fresnel*, dispuse simetric în jurul dreptei ce unește $I$ cu punctul $P$ spre care se propagă lumina. Zonele Fresnel au fost astfel alese încît distanțele de la două zone succesive la punctul $P$ să difere cu $\lambda/2$. În fig. 29 este reprezentată o secțiune, prin suprafața considerată, cu un plan care conține dreapta $IP$. Condiția de delimitare a zonelor se scrie

$$N_1P - OP = N_2P - N_1P = \ldots = N_{k-1}P - N_{k-2}P \ldots =$$
$$= N_kP - N_{k-1}P = N_{k+1}P - N_kP = \ldots = \frac{\lambda}{2}.$$

Să considerăm zona de ordinul $k$. Din triunghiurile dreptunghice în care $r_k$ împarte triunghiul $IN_kP$ rezultă

$$r_k^2 = a^2 - (a - x)^2 = b_k^2 - (b + x)^2.$$

Făcînd calculele, care sînt foarte simple, se obține

$$r_k^2 = 2ax - x^2 = b_k^2 - b^2 - 2bx - x^2; \qquad (43)$$

dar cum

$$b_k^2 = \left(b + k\frac{\lambda}{2}\right)^2 = b^2 + k^2\frac{\lambda^2}{4} + bk \approx b^2 + bk \qquad (44)$$

$k^2\frac{\lambda^2}{4}$ fiind neglijabil față de ceilalți termeni, din (43) și (44) rezultă

$$x = \frac{bk\lambda}{2(a+b)}$$

și

$$r_k = \sqrt{\frac{kab}{a+b}}\lambda. \qquad (45)$$

Aria $S_k$ a unei calote sferice fiind $2\pi ax$, avem

$$S_k = \frac{\pi abk}{a+b}\lambda$$

și

$$S_{k+1} - S_k = \frac{\pi ab}{a+b}\lambda = \text{const.}$$

Așadar, ariile tuturor zonelor Fresnel sînt egale și deci fiecare zonă cuprinde același număr de surse coerente și virtuale.

Să presupunem că acțiunea primei zone în punctul $P$ (de observație) este o oscilație de amplitudine $A_1$, acțiunea zonei alăturate — o oscilație de amplitudine $A_2$ ș.a.m.d. Fresnel a introdus ipoteza suplimentară

$$A_1 > A_2 > \ldots > A_{k-1} > A_k \ldots \qquad (46)$$

Din modul cum au fost delimitate zonele rezultă că secțiunile a două zone alăturate sînt în opoziție de fază. Amplitudinea rezultantă în $P$ este

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \ldots \text{ sau } A = A_1 - (A_2 - A_3) - (A_4 - A_5) - (A_6 - A_7) \ldots$$

Ținînd seama de (46), rezultă $A < A_1$, deoarece toate expresiile din paranteze sînt pozitive. Prin urmare, *amplitudinea oscilației rezultante este mai mică decît amplitudinea oscilației produsă de prima zonă.* Acțiunea suprafeței semisferice considerate se reduce astfel la acțiunea unei mici porțiuni din jurul punctului $O$ — prima zonă. Cum $\lambda$ este mult mai mic decît distanțele $a$ și $b$ (de exemplu, $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ m), zona centrală Fresnel este extrem de mică.



Rezultă că fluxul luminos se propagă spre punctul $P$ — care a fost ales un punct oarecare — în interiorul unui „canal"[1] extrem de îngust în jurul dreptei $IP$; *propagarea se face rectiliniu.*

Experimental, putem dovedi efectul contrar produs în $P$ de două zone Fresnel alăturate, folosind *o rețea zonată Soret*, adică un ecran cu inele alternativ transparente și opace, razele inelelor fiind astfel alese încît suprafața unui inel să fie egală cu suprafața unei zone Fresnel (fig. 30).

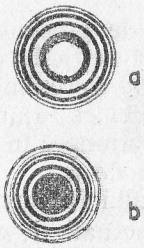



Fig. 30. Rețea zonată Soret.

Diferitele raze ale inelelor rețelei zonate sînt date de relația (45). Razele acestor inele (zone) se succed urmînd aceeași lege ca și succesiunea inelelor lui Newton obținute în lumină monocromatică. Această constatare a permis realizarea rețelelor zonate cu ajutorul fotografiilor inelelor lui Newton și micșorarea acestora pînă la dimensiunea ce interesează practic. Așezînd o astfel de rețea în fața sursei $I$, în $P$ va ajunge prin rețeaua zonată o perturbație luminoasă cu amplitudinea mai mare decît în lipsa rețelei zonate. Rețeaua zonată mărește (ca o lentilă convergentă) amplitudinea luminii care ajunge în $P$.

Rețelele zonate se construiesc în așa fel încît atunci cînd sînt plasate la distanța $a$ față de $I$ și deci la distanța $b$ față de $P$, să permită să treacă lumina, fie prin zone impare (fig. 30, a), fie prin zone de ordin par (fig. 30, b). În primul caz rețeaua zonată va acoperi zone de ordin par, iar în cel de al doilea caz zone de ordin impar. Efectul în punctul de observație este același.

Wood a confecționat o rețea zonată în felul următor: pe o bucată de sticlă de geam a așternut un strat fin de lac și apoi a gravat o rețea zonată în așa fel încît grosimea

[1] Este vorba aici despre un canal fictiv.

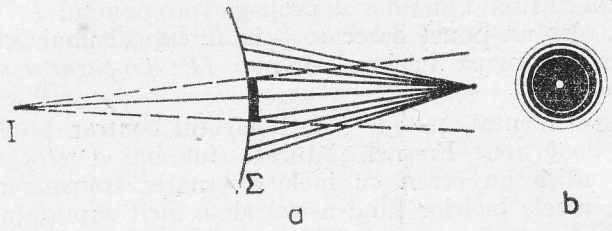



Fig. 31. Difracția luminii în cazul unui mic disc opac.

zonelor de ordin impar se deosebea de grosimea zonelor de ordin par prin $\lambda/2$. Plasînd această rețea la distanță $a$ față de $I$, a obținut în $P$ un efect de aproximativ 4 ori mai mare. În acest caz, între lumina ce ajungea în $P$ trecînd prin zone impare și lumina care ajungea în $P$ trecînd prin zone pare era o diferență de fază de $\pi$.

Și acum unele aplicații ale principiului Huygens-Fresnel.

În fața unei surse luminoase punctuale $I$, care emite lumină monocromatică, așezăm un mic disc opac și mai departe un ecran. Pe ecran umbra nu apare netă, așa cum ne-am așteptat ca urmare a propagării rectilinii a luminii. În centru apare o pată luminată cu marginile ușor estompate, înconjurată de un număr de franje alternativ întunecate și luminate, din ce în ce mai estompate (fig. 31, a și b). Aceeași constatare o facem dacă în locul discului așezăm o diafragmă, numai că în acest caz pata centrală este luminată sau întunecată, după cum deschiderea permite să treacă un număr impar sau un număr par de zone Fresnel (fig. 32, a, b și c).

Aceste experiențe dovedesc că există abateri de la propagarea rectilinie a luminii. Fenomenul se numește *difracția luminii*. Studiul fenomenelor de difracție constituie de fapt o continuare a studiului fenomenelor de interferență. Deosebirea dintre ele constă doar în aceea că, atunci cînd sînt două surse de lumină de la care pleacă unde ce interferă, fenomenul este denumit *interferență*, iar dacă numărul de surse este mare fenomenul este denumit *difracție*. Pînă în prezent nimeni nu a reușit să definească în mod satisfăcător diferența dintre interferență și difracție. Și aceasta pentru că de fapt nu există o deosebire fizică esențială între ele[1].

[1] Vezi: R. Feynman, *Fizica modernă*, vol. I, Editura tehnică, București, 1959, p. 441.



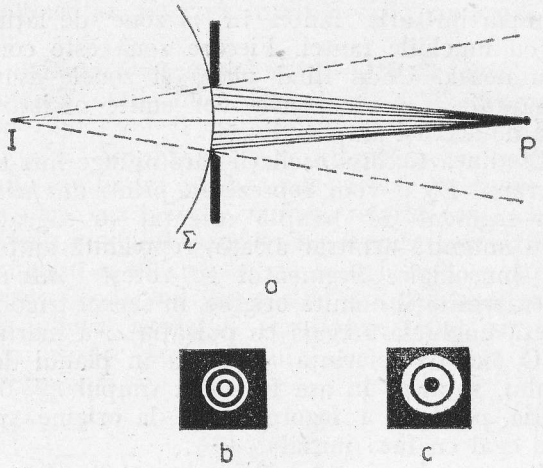



Fig. 32. Difracția luminii printr-un orificiu circular.

Să examinăm acum fenomenul de difracție produs de o fantă foarte îngustă, de lățime $b$ și de lungime practic infinită (cel puțin de 100 de ori lățimea fantei), iluminată cu un fascicul de raze paralele perpendiculare pe planul fantei (fig. 33). Suprafețele de undă sînt plane paralele între ele. Planul fantei este perpendicular pe planul figurii. După ieșirea din fantă, o lentilă convergentă $L$ formează imaginea sursei pe ecranul $E_2$, paralel cu planul fantei.

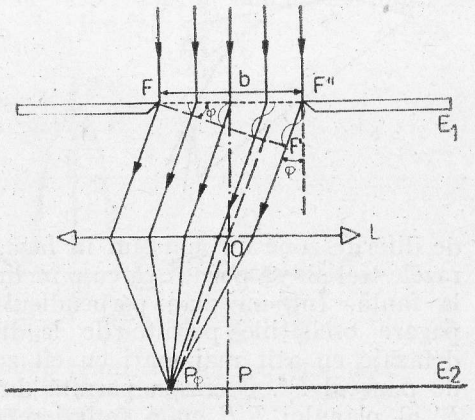



Fig. 33. Difracția luminii printr-o fantă.

Să împărțim aria fantei în $m$ zone de lățime $b/m$, paralele cu muchiile fantei. Fiecare zonă este considerată sursă luminoasă. Unda fiind plană și zonele avînd toate aceeași suprafață, toate zonele vor emite oscilații (unde) în fază și de aceeași amplitudine.

Amplitudinea fiecărei oscilații care ajunge într-un punct de pe ecranul $E_2$, o vom reprezenta printr-un *fazor*, adică printr-un segment de dreaptă orientat (o săgeată), care la o scară anumită arbitrar aleasă, reprezintă amplitudinea mărimii sinusoidale. Segmentul se rotește într-un plan, în jurul extremității numită origine, în sensul trigonometric, cu o viteză unghiulară egală cu pulsația $\omega$ a mărimii sinusoidale. O axă de referință, cuprinsă în planul de rotație al fazorului, se alege în așa fel ca la timpul $t = 0$ să facă cu direcția pozitivă a fazorului (de la origine spre vîrf) un unghi egal cu faza inițială.

Fie $P$ punctul ecranului $E_2$, conținut în planul figurii, situat pe axa de simetrie a fantei. Oscilația luminoasă rezultantă în $P$ se obține adunînd fazorii oscilațiilor tuturor zonelor. Acești fazori sînt practic paraleli, oscilațiile diferitelor zone în care am împărțit fanta avînd aceeași amplitudine și aceeași fază. În figura 34, a se arată cum se face însumarea. Fie $A_0$ amplitudinea oscilației rezultante în $P$. Pentru alt punct $P\varphi$ (fig. 34, b), oscilațiile produse

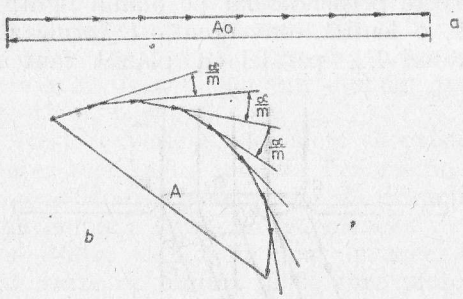



Fig. 34. Difracția luminii printr-o fantă; compunerea amplitudinilor.

de diferite zone nu mai sînt în fază. Pentru a ajunge în $P_\varphi$ razele trebuie să pornească cu o înclinare $\varphi$ față de normala la fantă. Într-un plan perpendicular pe direcția de propagare oscilațiile pornite de la diferitele zone ajung cu defazaje cu atît mai mari cu cît zona este mai apropiată de punctul $F''$. Oscilația pornită din $F''$ ajunge în punctul $F'$ al planului $F'F$ cu o întîrziere determinată de drumul



optic suplimentar pe care trebuie să-l parcurgă: $F''F' = b \sin \varphi$.

Dacă defazarea oscilației în $F'$ față de oscilația din $F$ este $\alpha$, fazorii oscilațiilor din planul $F'F$, corespunzători diferitelor zone, vor fi decalați unul față de celălalt cu un unghi $\alpha/m$. Amplitudinea rezultantă se micșorează așa cum rezultă din figura 34, b, unde se face însumarea acestor fazori. În acest caz fazorii, conform relației (46), au modulul mai mic decît modulul fazorilor reprezentați pe figura 34, a. Făcînd unghiul $\varphi$ să crească de la 0 la $\pi/2$, crește și $\alpha$ și, la un moment dat, cînd $\alpha/m = 360°/m$, poligonul se închide, iar amplitudinea oscilației rezultante în $P_\varphi$ se anulează. Acest lucru are loc cînd punctul $P_\varphi$ se găsește la o distanță de $P$ determinată de condiția

$$\sin \varphi = \frac{\lambda}{b}$$

adică atunci cînd $F''F' = \lambda$. Fenomenul se repetă pentru toate punctele $P_\varphi$, pentru care $b \sin \varphi = n\lambda$, unde $n$ este un număr întreg pentru care $\alpha = n \cdot 360°$.

În figura 35 se arată cum variază amplitudinea oscilației rezultante într-un punct $P_\varphi$ în funcție de $\sin \varphi$ (linia plină) și cum variază energia oscilației rezultante (linia punctată). Aceasta explică de ce în figura de difracție de pe ecranul $E_2$, în franja centrală este acumulată 80% din intensitatea luminoasă, restul de 20% repartizîndu-se pe celelalte franje.

Figura de difracție ia acest aspect numai în lumină filtrată, monocromatică. În lumină policromă (în lumină

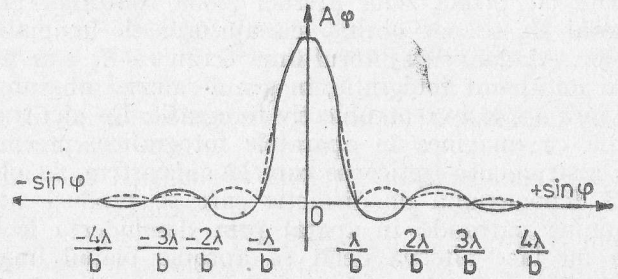



Fig. 35. Difracția luminii printr-o fantă: amplitudinea și pătratul amplitudinii în funcție de poziția punctului pe ecran față de fantă.

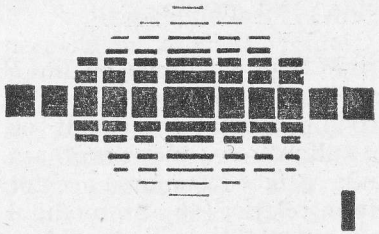


Fig. 36. Difracția în fasciculul paralel printr-o fantă „finită" (lățimea fantei mai mare decît 1/100 din lărgimea fantei).

albă; de exemplu) se obține în centru o imagine albă a fantei, mărginită de o succesiune de imagini colorate, corespunzătoare maximelor diferitelor lungimi de undă.

Mărimea fantei influențează foarte mult imaginea care se obține pe ecran. Dacă $b = \lambda$ primul minim este aruncat la infinit, așa cum se poate deduce din $\sin \varphi = \lambda/b$. Iluminarea ecranului scade treptat de la centru spre margini.

Dacă $b < \lambda$ nu se observă minimul, ci numai micșorarea intensității luminoase; distribuția intensității luminoase tinde să devină uniformă.

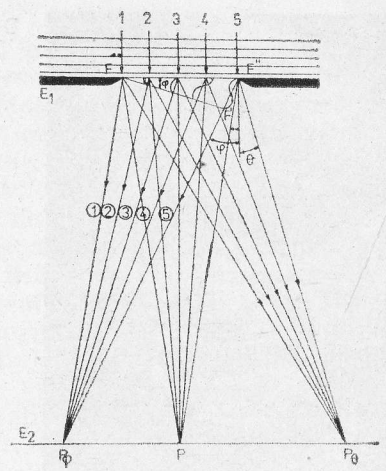
Dacă $b > \lambda$, primele minime încep să se apropie de centrul imaginii, iar principalul maxim devine din ce în ce mai îngust și mai iluminat, nu pentru că ar crește intensitatea lui relativă față de celelalte maxime, ci datorită faptului că odată cu lărgimea fantei crește cantitatea de lumină care străbate ecranul.

Dacă fanta are o lungime finită (mai mică decît $100b$), fenomenul difracției se produce în ambele sensuri și se obține o imagine ca în figura 36.

În figura 37 se arată cazul difracției Fraunhofer, fără a folosi lentila $L$. Dacă deschiderea practicată în ecranul $E_1$ este mare cît prima zonă Fresnel (zona centrală), atunci pe ecranul $E_2$ se pot obține, cu ajutorul ei, imagini ale obiectelor. Așadar, cu ajutorul unui ecran ca $E_1$ s-ar putea construi un aparat fotografic, în genul camerei obscure din trecut, fără a folosi vreun obiectiv fotografic. De aici tragem concluzia că imaginea în aparatele fotografice, precum și în alte instrumente optice pe care le cunoaștem, se obține datorită fenomenului de difracție care se produce atunci cînd lumina pătrunde în aparat prin deschiderea lentilei. Lentila nu face altceva decît să apropie planul imaginii de obiectiv, ca urmare a fenomenului de refracție pe care-l suferă lumina, cînd intră în aparat, prin substanța optică din care este confecționată lentila. În general, un obiectiv



Fig. 37. Efectul produs de difracția luminii printr-o fantă fără a folosi lentile. Imaginile obiectelor sînt mărite.




fotografic este alcătuit din una sau mai multe lentile și reprezintă piesa cea mai scumpă a aparatului. Se pune, evident, întrebarea: de ce în locul obiectivului, atît de costisitor, nu se folosește o deschidere practicată într-un ecran, deschidere avînd mărimea egală cu aceea a zonei centrale Fresnel? Costul aparatului ar fi considerabil redus! E adevărat, dar dimensiunile unor astfel de aparate ar fi atît de mari încît le-ar face inutilizabile. Într-adevăr, calculul arată că, dacă deschiderea ar avea diametrul de 4 mm, atunci distanța la care s-ar forma imaginea ar fi de minimum 800 cm (!), iar dacă diametrul deschiderii ar fi de 0,4 mm imaginea s-ar forma la circa 8 cm. Așadar, aparatele fotografice sînt echipate cu un obiectiv pentru ca dimensiunile lor (ale aparatelor) să fie cît mai reduse. (Într-adevăr, există aparate fotografice de dimensiunile unei cutii de chibrituri și chiar mai mici.) În plus, în cazul aparatelor cu obiectiv, iluminarea imaginii este mai mare decît în cazul unui aparat ce are în locul obiectivului o simplă deschidere, așa cum am arătat mai sus.

Principiul Huygens-Fresnel stă la baza noii metode de obținere a imaginilor în relief fără a folosi aparate fotografice sau obiective ale lor. Această nouă metodă se numește *holografie* și a fost inventată în anul 1948 de Dennis Gabor, care a pus și bazele teoretice ale metodei. Holografia a început să se dezvolte abia din 1964, adică după apariția

**Dennis Gabor**

Dennis *Gabor* (n. 1900), fizician englez de origine maghiară. Cercetînd, în laboratorul Companiei „Metropolitan Vickers" din Marea Britanie, metoda de obținere a imaginilor în relief, mai întîi prin îmbunătățirile aduse funcționării microscopului electronic, descoperă, în anul 1948, *holografia*. Această descoperire o publică în revista „Nature" din același an.

În anul 1971, Gabor a primit premiul Nobel, pentru „Tehnica holografiei".

Gabor s-a ocupat și cu studiul oscilografului catodic și al lentilelor magnetice. De asemenea are lucrări în teoria informației și în teoria comunicațiilor.

laserilor, deoarece erau necesare surse de lumină riguros coerente. Datorită holografiei, optica coerentă a cunoscut un progres considerabil.

Prin fotografiere obișnuită se înregistrează numai una dintre mărimile caracteristice ale undei optice coerente, *intensitatea*. Prin holografiere, însă, se înregistrează — pe o placă fotografică — ambele mărimi caracteristice ale undei luminoase coerente: *intensitatea* și *faza*. Însuși cuvîntul



holografie derivă de la: *holos* — întreg, *graphein* — înregistrare. În fotografia obișnuită, pierzîndu-se faza, se pierde și o parte însemnată din informațiile despre obiect. Prin holografiere, înregistrîndu-se și faza undei luminoase coerente, informațiile despre obiect sînt complete. În aceasta constă interesul sporit pentru holografie. Placa fotografică obținută pe această cale se numește *hologramă*. Uluitor este, însă, faptul că numai cu o porțiune de hologramă se poate reconstitui obiectul în întregime. Se atenuează, însă, puterea de separare, adică nu se văd suficient de clar toate detaliile imaginii. Evident că în fotografia obișnuită o parte din fotografie nu redă imaginea în întregime. Pentru a obține întreaga imagine a obiectului trebuie să avem toate bucățile de fotografie.

Pe o aceeași placă fotografică se pot înregistra, prin metode holografice, mai multe imagini, fiecare înregistrare făcîndu-se sub un anumit unghi, unghiurile fiind diferite între ele; la reconstituire, fasciculul laser trebuie să ajungă pe hologramă sub același unghi ca la înregistrare. De aici, posibilitatea, aparținînd numai tehnicii holografice, de a stoca informații multiple pe o suprafață relativ mică. O porțiune de hologramă redă, la reconstituire, toate informațiile înregistrate, evident iluminînd porțiunea de hologramă cu lumină a cărei direcție să formeze aceleași unghiuri cu normala la planul plăcii fotografice, ca la înregistrare.

Hologramele pot fi multiplicate obținîndu-se, astfel, cópii ale acestora, care sînt la fel de bune ca și hologramele originale. Hologramele pozitive, rezultate din hologramele negative (imaginea negativă și pozitivă în fotografia obișnuită), nu prezintă interes, deoarece ar avea aceleași proprietăți ca și hologramele negative.

Hologramele permit înregistrarea mai multor unde succesive în timp, pe o aceeași emulsie fotografică. La restituire are loc un fenomen de amplificare a amplitudinii și fazei. Aceasta constituie o proprietate remarcabilă a hologramelor.

În holografie[1] se folosește limbajul și aparatul matematic utilizat în teoria comunicațiilor.

Să presupunem că privim afară dintr-un colț al unei ferestre. Obiectele ne vor apare cu o anumită poziționare

[1] Vezi, de exemplu, *Efecte fundamentale în fizică* de Gh. Hușanu, Editura Albatros, București, 1975, p. 234—246, sau *Holografia* de Gh. Hușanu și Jean Dorin, Editura științifică și enciclopedică, București, 1979.

în spațiu față de noi. Privind apoi din alt colț al ferestrei aceleași obiecte vor apare cu o altă aranjare în spațiu. Informațiile de la obiectele de afară trec prin planul ferestrei sub formă de unde luminoase, formîndu-se pe retină o imagine. Dar, în acord cu principiul Huygens-Fresnel, informațiile care au ajuns pe retină la un moment dat se pot obține din informațiile ajunse de la sursă la un moment anterior, în alt loc, cum ar fi de exemplu în planul ferestrei. Înseamnă că dacă am putea „îngheța" informațiile în planul ferestrei, de pildă pe o placă fotografică și am suprima obiectul, am putea vedea obiectul oricînd ca și cum acesta ar fi prezent. Pentru aceasta ar trebui să dispunem de o metodă care să permită, la un moment dat, „dezgheța" informațiilor. Aceasta se realizează prin metoda holografică, metodă care permite, așa cum spuneam mai înainte, înregistrarea atît a intensității (amplitudinii), cît și a fazei unei unde optice coerente. În acest fel nu se pierde nimic din informațiile despre obiect. În aceasta constă holografia și ea are la bază principiul Huygens-Fresnel și proprietățile interferenței luminii.

Paralel cu holografia optică se dezvoltă și holografia acustică. Principiul holografiei optice se aplică și undelor acustice. Obiectele sînt iradiate, folosind în locul undelor luminoase, cu unde ultrasonice[1] coerente, care pătrund și în interiorul corpurilor opace, permițînd astfel să se obțină imagini în trei dimensiuni și a interiorului acestora. În acest scop s-au creat sisteme de *sonoviziune*. Dar există și se dezvoltă în aceeași măsură holografia cu ajutorul *undelor radio*. Astfel, au fost create sisteme de *radioviziune*, adică sisteme care folosesc undele radio.

Dintre multiplele aplicații ale holografiei menționăm: cinematograful în relief, care nu peste multă vreme se va introduce în exploatare largă, televiziunea holografică, cititoarele optice, prelucrarea seismogramelor și a altor date geofizice.

Metodele holografice se aplică, de asemenea, la cercetarea calității suprafețelor, la cercetarea distribuției tensiunilor în volumul pieselor transparente. Mai menționăm faptul că în prezent s-au obținut holograme care dau posibilitatea obținerii de imagini în relief, folosind ca sursă de lumină Soarele sau alte surse obișnuite de lumină albă. În acest

[1] Unde acustice cu frecvență mai mare de 20 000 Hz.



scop s-au creat procedee speciale, care diferă, evident, de cele obișnuite în care se folosesc ca surse de lumină laserii. De asemenea, menționăm că s-a reușit să se obțină holograme color, cu ajutorul cărora, la restituire, se obțin imagini în relief și în culori.

Să presupunem că se sondează cu unde ultrasonice apa mării pe toată adîncimea ei. Semnalele reflectate sînt astfel prelucrate încît se obține imaginea integrală a fundului marin, în volume și culori, așa cum apare el pentru un observator care privește fundul mării prin hubloul unui submarin. Superioritatea metodei este evidentă în comparație cu metodele cunoscute, de pildă radarul, cu ajutorul cărora se determină distanțele pînă la obstacole și eventual poziția obstacolelor.

Pentru studierea structurii interne a corpului omenesc se folosesc radiațiile *X*. Însă iradierea repetată sau îndelungată a organismului viu cu aceste radiații dăunează. Pentru evitarea acestui mare neajuns se folosește sonoviziunea. Sonoviziunea reprezintă o metodă nouă de investigare a organismului omenesc sau a unui corp folosind un aparat numit *holograf cu ultrasunete*. Aparatul permite să se descopere mai ușor tumorile, imaginile acestora fiind date în relief; în acest fel se poate preciza locul și mărimea acestora, fără ca organismul viu să fie lezat.

Holografia reprezintă singurul mijloc de înregistrare instantanee a proceselor volumetrice, ca de exemplu, mișcarea fluxurilor de aer în conducte aerodinamice, ejectarea gazelor din motoarele cu reacție, procesele care însoțesc arderea și explozia.

Metodele holografice permit, între altele, să se determine, de exemplu, diametrul unei picături (diametru ce ar putea fi de cîțiva micrometri), cînd aceasta se deplasează cu o viteză egală sau de cîteva ori viteza sunetului în aer (de exemplu, dimensiunile unei picături ce iese dintr-un pulverizator de apă de colonie, parfum or fixativ pentru păr sau pulverizator de aerosoli). Nici o altă metodă, cu excepția celei holografice, nu permite o astfel de determinare. Primele determinări cu acest procedeu au fost făcute după anul 1965.

Dar una din cele mai importante aplicații industriale ale holografiei o constituie *analiza nedistructivă* a obiectelor.

Această metodă de analiză are la bază interferometria holografică și a condus la crearea unei mari intreprinderi industriale (prima de acest gen în statul Michigan din nordul S.U.A.).

## PRINCIPIUL COMPLEMENTARITĂȚII

În anul 1927, fizicianul german Werner Heisenberg a stabilit cunoscutele *relații de nedeterminare*, care-i poartă numele.

Aceste relații sînt

$$\Delta x \cdot \Delta p \geqslant h$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geqslant h.$$

Ele spun că în domeniul microparticulelor există anumite limitări în ceea ce privește măsurarea parametrilor dinamici. Astfel, eliminînd erorile instrumentelor, erorile de metodă și de observație, coordonatele și impulsul unei particule pot fi cunoscute cu o precizie doar pînă la constanta lui Planck și aceasta nu din cauză că încă nu avem aparatura adecvată, ci fiindcă legile de mișcare înseși impun această imprecizie (nedeterminare[1]).

Prin urmare, dacă la un moment dat putem, de exemplu, localiza o particulă elementară (măsurîndu-i coordonatele), în schimb nu putem spune nimic despre impulsul (viteza) ei.

Vom da un exemplu. Pentru aceasta să revenim la experiența din figura 37, în care, în locul fasciculului luminos să presupunem că se folosește un fascicul de electroni și să considerăm numai componenta impulsului lor după axa $Ox$ (pe care o luăm paralelă cu fanta). Fie $\Delta p$ această componentă a impulsului și $\Delta x$ lărgimea fantei. Trecînd prin fantă, fasciculul de electroni suferă fenomenul de difracție și pe $E_2$ va apare figura de difracție corespunzătoare. Graficul variației intensității, adică a numărului de electroni pe unitate de suprafață a ecranului $E_2$, în funcție de coordonata $x$, este asemănător cu cel din fig. 35. Unghiul de difracție $\varphi$ se calculează cu o relație similară cu aceea dată la p. 123, numai că în locul lărgimii fantei $b$ vom scrie $\Delta x$. Deci

$$\sin \varphi = \frac{\lambda}{\Delta x}.$$

Însă, la trecerea prin fantă, datorită fenomenului de difracție, impulsul $\Delta p$ al fiecărui electron capătă o valoare cuprinsă între $-p \sin \varphi$ și $+p \sin \varphi$, unde $p$ reprezintă impulsul inițial, în valoare absolută, al electronilor, adică impulsul lor înainte de a pătrunde prin fantă. Componenta impulsului după axa $Ox$ satisface condiția

$$\Delta p \geqslant p \sin \varphi;$$

cum, însă, $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\Delta x \sin \varphi}$, rezultă

$$\Delta p \cdot \Delta x \geqslant h.$$

Aplicate la corpurile macroscopice, aceste relații nu prezintă nici o semnificație practică, din motive evidente.

Werner *Heisenberg* (1901—1976), fizician german născut la Würtzburg, discipol al lui Bohr, la Copenhaga, a fost profesor de fizică teoretică la Universitatea din Leipzig. În anii 1928 și 1929 a fost invitat să țină prelegeri de fizică atomică la mai multe universități din S.U.A., din Japonia și India.

Heisenberg are lucrări importante în domeniul fizicii teoretice, fiind unul dintre fondatorii mecanicii cuantice.

În anul 1932, la vîrsta de numai 31 de ani, i se decernează premiul Nobel pentru fizică, pentru crearea mecanicii cuantice, după ce în anul 1927 stabilise deja relațiile de nedeterminare.

În anul 1946, este numit director al Institutului de fizică „Kaiser Wilhelm", după care fondează Institutul de fizică „Max Planck" din Göttingen. În anul 1958, Heisenberg se mută cu întregul institut la München. A conlucrat în decursul anilor cu N. Bohr, A. Einstein, M. Planck, A. Sommerfeld, W. Pauli ș.a. Din anul 1953 a fost președintele fundației „Alexander von Humboldt." W. Heisenberg a fost doctor honoris causa al unui impresionant număr de universități de pe toate continentele ș.a.m.d.

[1] Mai detaliat despre această problemă vezi de exemplu: *Fizica modernă*, de R. Feynman, vol. I, p. 110, 580, 583, Ed. tehnică, București, 1969, sau *Fizica* de D. Halliday și R. Resnick, vol. I, p. 141, Ed. didactică și pedagogică, București, 1975, sau *Elemente de Fizică Modernă* de E. Luca, vol. I, p. 109, Editura Junimea, Iași, 1974.

**Werner Heisenberg**

Heisenberg a elaborat o teorie a particulelor elementare plecînd de la ideea unui cîmp spinorial neliniar universal, o teorie a forțelor nucleare și a radiațiilor cosmice.

Heisenberg a fost, de asemenea, unul dintre fondatorii electrodinamicii cuantice. Din punct de vedere filozofic, Heisenberg s-a aflat mult timp sub influența pozitivismului, fiind unul dintre reprezentanții așa-numitei „Școli de la Copenhaga". În concepțiile sale a existat, în același timp, o oscilare între materialismul spontan și idealismul obiectiv. Ulterior, însă, a trecut pe poziții filozofice mai avansate îndepărtîndu-se de pozitivism.

Ca opere principale ale sale sînt considerate: „Interpretarea cuantică a relațiilor cinematice și mecanice" publicată în anul 1925; „Principiile fizice ale teoriei cuantice" (1926) și „Fizica și filozofia" (1958).

...Heisenberg avea deosebită plăcere să lucreze, vara, în grădini ale unor prieteni. Într-una din zile, pe cînd se afla într-o astfel de grădină și lucra, veni fiica prietenului său — gazda — care avea aproape 20 de ani și, văzînd pe masa de lucru unele cărți și hîrtii, l-a întrebat politicos pe savant cu ce se ocupă, la care acesta i-a răspuns glumind: „Eu studiez, încă, mereu fizica". La auzul acestei afirmații, fata nu și-a putut stăpîni mirarea: „Ce spuneți?! La această vîrstă? Noi la școală am terminat cu ea în numai doi ani"!?!



Așa cum se știe, fenomenele de interferență, difracție și polarizare a luminii nu se pot explica decît admițînd modelul ondulatoriu al luminii. Alte fenomene, însă, cum sînt efectul fotoelectric, efectul Compton, nu se pot explica decît dacă se admite că lumina are aspect corpuscular. Cu alte cuvinte, putem spune că în unele fenomene lumina se manifestă ondulatoriu, iar în altele corpuscular. Această constatare i-a determinat pe fizicieni să admită caracterul dual al luminii și, așa cum a arătat Louis de Broglie, în anul 1924, fotonului îi este asociată o undă a cărei lungime este

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

în care $p = mc$ reprezintă *impulsul fotonului*, $m$ este masa de mișcare a acestuia și $c$ viteza lui în vid.

Plecînd de la relațiile de nedeterminare, Niels Bohr a explicat dualismul undă-corpuscul (foton) afirmînd că cele două aspecte sub care se prezintă lumina sînt *complementare*, în sensul că nu se pot pune în evidență în același timp ambele aspecte ale fenomenului luminos: dacă se determină caracterul ondulatoriu, este imposibil să se determine în același timp și caracterul corpuscular sau, dacă se determină aspectul corpuscular nu este posibil ca, în același timp, să se determine și aspectul ondulatoriu.

Vom susține această afirmație a lui Bohr prin descrierea următoarei experiențe. În fața unui ecran opac în care s-au practicat două fante fine, paralele și identice, apropiate, se plasează o sursă de lumină $I$, punctuală. Între sursă și ecran se așază o lentilă, în așa fel încît focarul ei din spațiul obiect să coincidă cu locul în care se află $I$ (fig. 38). Pe ecranul $E_2$ se observă o figură de interferență. Aceasta este experiența lui Young, efectuată în 1801, demonstrînd experimental pentru întîia oară fenomenul de interferență a undelor luminoase, deci caracterul ondulatoriu al luminii. Interferența se produce între cele două unde ce pleacă de la fantele $f_1$ și $f_2$, unde care, evident, sînt coerente. Înlăturăm ecranul $E_2$ și în locul lui plasăm o celulă fotoelectrică. În acest fel se poate demonstra caracterul corpuscular al luminii chiar în franjele de interferență. Aceasta ne poate conduce la concluzia, eronată, că în același timp se poate demonstra aspectul ondulatoriu și corpuscular (fotonic)

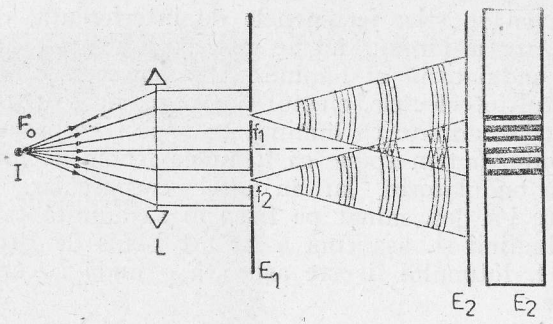



Fig. 38. Experiența lui Young.

al luminii. Dar iată cum stau lucrurile în realitate. Pentru a se putea demonstra aspectul corpuscular al luminii trebuie să se precizeze experimental minimum două puncte ale traiectoriei unui foton, iar pentru a demonstra caracterul ondulatoriu, trebuie să se poată observa cel puțin două maxime de interferență.

Să analizăm acum aspectul corpuscular. Pentru a demonstra acest aspect trebuie stabilit cu maximum de precizie dacă fotonul a trecut, pentru a ajunge la celula fotoelectrică, prin fanta $f_1$ sau prin fanta $f_2$. În acest scop se plasează între $E_1$ și celulă un film fotografic pentru a ne arăta, de exemplu, că fotonul a trecut prin $f_1$. Trecînd prin film, însă, fotonul va fi deviat de la traiectoria lui inițială și, ca urmare, posibilitatea ca el să ajungă la celula fotoelectrică este mult mai mică decît în lipsa filmului. Aceasta înseamnă că dacă dorim, vom putea observa figura de interferență pe $E_2$, dar nu vom putea observa, în același timp, vreun punct al traiectoriei fotonului, înainte ca acesta să ajungă pe ecranul $E_2$ plasat în locul celulei.

Bohr a arătat că nu numai în cazul luminii cele două aspecte sînt complementare, ci și în cazul oricărui fenomen cu aspect dual. De aici și pînă la formularea principiului complementarității n-a mai fost decît un pas.

În anul 1927 s-a ținut la Como, în Italia, un congres internațional de fizică consacrat comemorării marelui fizician Volta (1745—1827). La acest congres, la care au participat vîrfuri ale fizicii mondiale, savantul danez Niels Bohr a formulat pentru prima dată faimosul *principiu al complementarității*. Formularea lui Bohr este următoarea:



*„Contraria non contradictoria sed complementa sunt" (latur le contrarii nu sînt contradictorii, ci sînt complementare).* Formularea principiului complementarității, dată de Bohr, reprezintă cea mai scurtă și mai frapantă formulare a renumitului principiu.

Bohr a dezvoltat ulterior principiul complementarității într-o filozofie nouă a fizicii. Pe baza principiului complementarității se rezolvă definitiv contradicția aparentă conținută în dualitatea undă-corpuscul a materiei.

Bohr a arătat că, în acord cu principiul complementarității, natura are două fețe complementare și că aceste fețe nu sînt vizibile în același timp, simultan; după modul cum o interogăm, ea ne arată una dintre fețele sale. Așa, de exemplu, dacă vrem să măsurăm cu precizie impulsul unei particule, ea ni se va prezenta cu proprietățile sale ondulatorii, iar dacă vom dori să determinăm cu precizie poziția ei, atunci se vor manifesta proprietățile ei corpusculare.

Mai departe, el a arătat că proprietățile corpusculare și ondulatorii nu trebuie tratate în mod unitar, pentru că acestè proprietăți nu pot exista decît separat și, chiar mai mult, sînt aspecte care se exclud reciproc. Însă, spunea Bohr, trebuie imediat să adăugăm că, în același timp, aceste proprietăți sînt complementare și, de aceea, numai totalitatea lor cuprinde tot ce am putea cunoaște despre obiectul respectiv.

Principiul complementarității a fost aplicat de către Bohr[1] și discipolii săi și în alte domenii decît fizica: de exemplu, în biologie, antropologie, etnologie, psihologie, logică ș.a. Ei au analizat într-un mod deosebit de spiritual, perechi de noțiuni complementare cum sînt: cunoaștere și creier, rațiune și instinct etc.

Niels *Bohr* (1885—1962), fizician danez, savant atomist de renume mondial, fondatorul Școlii de la Copenhaga.

S-a născut la Copenhaga. Pe cînd era în vîrstă de numai 21 ani a elaborat prima sa lucrare științifică „Vibrația superficială a jeturilor lichide", lucrare care a fost premiată cu medalia de aur a Societății științifice daneze. După 5 ani de la acest eveniment își ia doctoratul la Copenhaga cu teza „Studiu asupra electronilor în

[1] Vezi cartea acestuia *Fizica atomică și cunoașterea umană*, apărută în Editura științifică, București, 1969, p. 47—89.

Niels Bohr

metale". La scurt timp după susținerea tezei de doctorat pleacă în Marea Britanie la Cambridge pentru a lucra în laboratorul „Cavendish", sub îndrumarea lui J.J. Thomson.

În anul 1912 elaborează modelul de atom ce-i poartă numele, după ce, în prealabil, își dăduse seama de insuficiențele modelului lui Rutherford. Dar și modelul lui Bohr a suferit îmbunătățiri, aduse de Sommerfeld, conducînd la modelul Bohr-Sommerfeld.

În anul 1927, Bohr formulează faimosul *principiu al complementarității*, bazîndu-se pe relațiile de nedeterminare ale lui Heisenberg și pe dualismul undă-corpuscul. Acest remarcabil principiu l-a formulat cu prilejul Congresului Solvay, care s-a ținut la Como în Italia, în anul 1927. Principiul complementarității a apărut din necesitatea de a interpreta rezultatele mecanicii cuantice.

În anul 1961, Bohr este invitat în U.R.S.S. Cu acest prilej îi face o vizită fizicianului sovietic Ivanenko, în cabinetul acestuia de la facultate, unde pe un perete a scris cu cretă cea mai frapantă formulare a principiului complementarității: „Contraria non contradictoria sed complementa sunt" și a semnat, Niels Bohr.

Împreună cu J.A. Wheeler, Bohr a elaborat teoria fisiunii nucleare a uraniului.

În anul 1922 lui Niels Bohr i s-a decernat premiul Nobel pentru lucrarea „Teoria radiației și structurii atomului".

...Pentru destindere, Bohr prefera cinematograful și cu deosebire filmele cu cowboy.

Bohr avea o expresie preferată: „Nu am intenția să, ... dar ..." Uneori se plimba cu cîte o revistă deschisă în mînă, spunînd: „Nu am intenția să critic, dar aș vrea să înțeleg cum poate un om să scrie o astfel de prostie".



## PRINCIPIUL EXCLUZIUNII

Pentru a înțelege principiul excluziunii trebuie să amintim cîteva noțiuni, necesare, din fizica atomică și nucleară.

Astfel, se știe că în atom electronii nu pot ocupa decît anumite orbite, determinate de unii parametri caracteristici[1].

Acești parametri sînt *numerele cuantice: numărul cuantic principal n, numărul cuantic orbital l, numărul cuantic magnetic m* și *numărul cuantic de spin s*. Fiecare dintre acestea are un „rol" precis în determinarea comportării atomului și nucleului.

Astfel, *numărul cuantic principal n* (care poate lua valorile $n = 0, 1, 2, ...$) stabilește ordinea așezării electronilor în jurul nucleului, pe orbitele electronice, precum și starea lor energetică (în ordinea depărtării de nucleu, orbitele sînt desemnate prin literele $K, L, M, ...$).

*Numărul cuantic orbital l* (cu valorile posibile $l = 0, 1, 2, ..., n - 1$) definește, în mare, excentricitatea elipselor pe care se mișcă electronii și momentul cinetic orbital (constant) al acestora

$$|\vec{p}| = \sqrt{l(l+1)}\,\hbar$$

(unde $\hbar = h/2\pi$ este constanta lui Planck).

Excentricitatea elipsei crește cu $l$ (fig. 39). Deobicei stările cu $l = 0, 1, 2, ...$ sînt desemnate prin $s, p, d, f^2, ...$

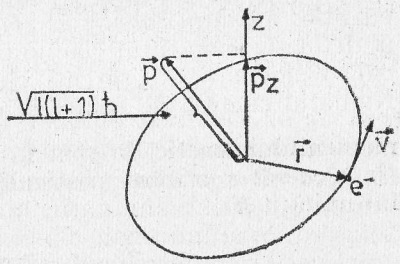



Fig. 39. Creșterea excentricității elipsei cu creșterea numărului cuantic orbital.

[1] Cititorul care dorește informații suplimentare poate consulta lucrările: *Spectroscopie atomică și moleculară* de M.A. Eliașevici, traducere din lb. rusă, Ed. Acad. R.S.R., Buc., 1966; *Fizica* de E. Luca ș. a. Ed. did. și ped., Buc., 1976; *Elemente de fizică modernă* de E. Luca, Ed. Junimea, Iași, 1974; *Fizica modernă* de R. Feynman, vol. II, Ed. teh., Buc., 1970.

[2] Vezi de ex. în *Fizica generală* de I.C. Moisil și Gh. Hușanu, Edit. did. și ped., Buc., 1968, p. 294.

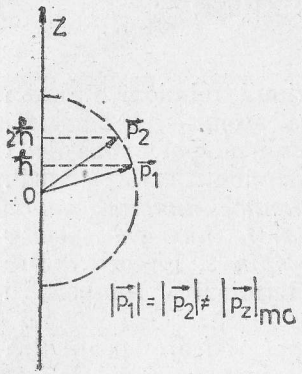



Fig. 40. Orientarea orbitei electronului și proiecția lui $\vec{p}$ pe o axă $Oz$ aleasă arbitrar.

*Numărul cuantic magnetic* ($m = l, \ -(l-1), \ldots -l, 0, l, \ldots$, adică în total $(2l+1)$ valori) este legat de momentul cuantic magnetic, care definește orientarea și proiecția lui $\vec{p}$ pe axa aleasă $Oz$ (fig. 40)

$$|\vec{p}_z| = m\hbar.$$

Numărul cuantic magnetic este egal cu valoarea numerică a proiecției momentului cinetic orbital, exprimată în unități $\hbar$, pe direcția locală a cîmpului magnetic.

În sfîrșit, pentru a defini complet un electron ce gravitează în jurul nucleului trebuie introdus al patrulea număr cuantic: *numărul cuantic de spin* $s$. Acesta ia valoarea $\pm 1/2$ și definește momentul cinetic propriu al electronului (particulă elementară, cu sarcină electrică, în mișcare de rotație). Numărul cuantic de spin este egal cu valoarea numerică a momentului cinetic de spin (a spinului), $\vec{p}_s$ al electronului (în general a oricărei particule fundamentale), exprimată în unități $\hbar$

$$|\vec{p}_s| = \sqrt{s(s+1)}\,\hbar.$$

Dacă proiectăm vectorul $\vec{p}_s$ pe axa $Oz$, aleasă arbitrar, obținem

$$(p_s)_z = \pm s\hbar = \pm \frac{1}{2}\hbar,$$



deci momentul cinetic propriu al electronului poate avea numai două orientări posibile: paralel sau antiparalel cu momentul cinetic orbital.

În general, în prezența unui cîmp electric sau magnetic, starea — deci energia — unui electron[1] este determinată de cele patru numere cuantice de mai sus. Acestea sînt numere întregi sau fracționare și ele intervin în cuantificarea diverselor mărimi (energie, moment cinetic, moment magnetic etc.), caracteristice stărilor staționare ale unui sistem cuantic: atom, nucleu sau moleculă.

În anul 1925, Pauli, a formulat un principiu, denumit *principiul excluziunii* (căruia i se mai spune și *principiul lui Pauli*): *într-un același atom sau sistem atomic (moleculă) nu pot exista doi electroni în exact aceeași stare;* altfel spus, *nu pot exista doi electroni caracterizați prin aceleași patru numere cuantice: n, l, m* și *s*.

Conform principiului de excluziune, pe o pătură electronică numărul de electroni este limitat și se calculează cu ajutorul relației

$$N = 2n^2,$$

unde $n$ este, evident, numărul cuantic principal. Pe această bază se poate explica succesiunea elementelor în sistemul periodic al elementelor. Așadar, studiind combinațiile posibile ale celor patru numere cuantice, regăsim toate corpurile simple din natură.

Experiența arată că sînt esențiali electronii ultimei pături, deoarece ei determină proprietățile spectroscopice și chimice ale elementelor și ei se numesc *electroni de valență;* atomii a căror pătură periferică este completă (saturată) sînt, din punct de vedere chimic, inerți (așa sînt atomii gazelor inerte); atomii ale căror pături periferice au aceeași configurație au proprietăți spectroscopice și chimice analoage.

Pauli a formulat principiul care-i poartă numele înaintea apariției mecanicii cuantice, în urma analizării și generalizării rezultatelor experimentale din domeniul spectroscopiei atomice, pentru a se putea explica lipsa unor stări energetice posibile din punct de vedere formal.

Principiul excluziunii a căpătat un înțeles mai larg după apariția mecanicii cuantice. El a fost extins la toate siste-

[1] Sau a oricărui alt obiect cuantic (nucleu, particulă elementară).

mele identice de fermioni (particule elementare care sînt, descrise de statica Fermi-Dirac, avînd numărul cuantic de spin semiîntreg; din această categorie de particule fac parte: electronul, protonul, neutronul, neutrinul și antiparticulele acestora).

Wolfgang *Pauli* (1900—1958) s-a născut în anul în care Planck emite ipoteza cuantelor, în Austria. A fost profesor la Institutul politehnic din Zürich și la Universitatea Princeton din S.U.A. (unde a fost profesor și Einstein). Pentru a se putea explica proprietățile sistemelor atomice și distribuția elementelor în sistemul periodic, Pauli a formulat în anul 1925, faimosul principiu denumit de el *principiul excluziunii*.

Șase ani mai tîrziu a prevăzut existența particulei elementare denumită *neutrino*, particulă care a fost descoperită experimental mult mai tîrziu. Pauli a emis ipoteza neutrinului pentru a explica abaterea aparentă de la legile de conservare a energiei și a momentului cinetic atunci cînd se produce dezintegrarea $\beta(\beta^-$ și $\beta^+)$. A primit premiul Nobel, în anul 1945, pentru principiul excluziunii

# LEGI ALE CĂROR EXPRESII MATEMATICE CUPRIND CONSTANTE UNIVERSALE

*„Oare corpurile nu acționează la distanță asupra luminii și nu încurbează prin acțiunea lor razele de lumină?"*

I. Newton

## LEGEA FUNDAMENTALĂ A DINAMICII

Se știe că două sau mai multe corpuri pot să interacționeze[1] fie direct (prin contact), fie printr-o formă de cîmp fizic: cîmp gravitațional sau gravific, cîmp electric, cîmp magnetic etc. Astfel, două corpuri care se ciocnesc suferă o interacțiune directă. Cîmpul gravitațional al Pămîntului determină corpurile să cadă pe suprafața sa; în acest caz interacțiunea dintre corp și Pămînt se produce prin intermediul cîmpului gravitațional.

Indiferent care este forma (natura) cîmpului, interacțiunile dintre corpuri se transmit prin intermediul cîmpului din aproape în aproape, adică de la un punct la altul, cu o anumită viteză.

Cîmpul fizic reprezintă o formă de existență a materiei și este generat de către corpuri în jurul lor. Unele cîmpuri fizice, cum sînt cîmpul electrostatic, cîmpul magnetic, pot fi evidențiate cu ajutorul spectrului liniilor de cîmp. Orice cîmp fizic este caracterizat în fiecare din punctele sale printr-o mărime fizică vectorială numită *intensitate a cîmpului respectiv.*

Cantitativ, interacțiunea este măsurată prin mărimea fizică vectorială numită *forță*. Dacă un corp, sau un sistem de corpuri, acționează asupra unui alt corp, acesta din urmă poate să se deformeze, să-și mărească sau să-și micșoreze viteza ori poate, în același timp, să se deformeze și să-și modifice viteza. Acestea sînt *efecte ale forței* și prin ele se evidențiază forța, adică prin efecte ale ei se poate defini și măsura forța.

Se știe că mișcarea unei particule se caracterizează, din punct de vedere dinamic, prin mărimea fizică vectorială

[1] Reamintim că interacțiunea reprezintă proprietatea corpurilor de a acționa unele asupra altora.



numită *impuls* și că, prin definiție, impulsul este dat de produsul dintre masa particulei și viteza sa

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

Considerînd ca efect al forței numai variația vitezei particulei, deci variația impulsului, se scrie

$$\vec{F} = \frac{\mathrm{d}\vec{p}}{\mathrm{d}t}. \tag{47}$$

Relația (47) exprimă *legea variației impulsului*, denumită și *legea forței* și se formulează astfel: *forța care acționează asupra unei particule este egală cu variația impulsului particulei în unitatea de timp.*

Aceasta este *legea fundamentală a dinamicii.*

Deoarece în mecanica clasică masa particulei (sau, în general, a unui corp) este o mărime constantă, relația (47) se poate scrie[1]

$$\vec{F} = m\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t} = m\vec{a}. \tag{48}$$

Relația (48) reprezintă *legea fundamentală a dinamicii clasice*, denumită, de asemenea, *legea forței*, așa cum a dat-o Newton. De aceea, această lege se mai numește și *legea lui Newton.* Ea este valabilă numai cînd viteza particulei este mică în comparație cu viteza luminii în vid ($v \ll c$, pentru viteze $v \leqslant 3 \cdot 10^4$ m/s). Ne dăm seama că definiția (47) este mai cuprinzătoare decît (48).

Pe baza formulei (48), legea forței se formulează astfel: *într-un referențial inerțial accelerația unei particule este direct proporțională cu forța care a imprimat-o și are aceeași orientare ca și forța.*

Măsurarea unei forțe se face comparînd efectul ei cu efectul produs asupra aceluiași corp de către o forță egală cu unitatea și denumită *forță etalon.*

*Masa* este una dintre cele mai importante caracteristici ale corpurilor. Masa unui corp reprezintă măsura inerției lui și în mecanica clasică este o mărime constantă, un scalar.

[1] Vezi și p. 353 din prezentul volum.

Să presupunem că o forță $\vec{F}$ acționează asupra unui corp cu masa $m_1$ și îi imprimă o accelerație $\vec{a}_1$; acționînd apoi asupra unui alt corp cu masa $m_2$ îi imprimă accelerația $\vec{a}_2$. Aplicînd relația (48) vom scrie (scalar)

$$F = m_1 a_1, \qquad F = m_2 a_2,$$

deci

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_1}{a_1}.$$

Această egalitate ne arată că *aceeași forță, sau forțe egale, acționînd asupra corpurilor de mase diferite, le imprimă accelerații invers proporționale cu masele lor.*

Fie acum o forță $\vec{F}_1$ care, acționînd asupra unui corp cu masa $m_1$, îi imprimă accelerația $\vec{a}$ și o forță $\vec{F}_2$ care imprimă unui corp cu masa $m_2$ o accelerație egală cu prima, adică tot $\vec{a}$. Folosind relația (48) obținem (scalar)

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{F_1}{F_2}.$$

Deci, *forțe diferite, acționînd asupra corpurilor de mase diferite, le imprimă accelerații egale, dacă forțele sînt direct proporționale cu masele corpurilor.*

În fine, să presupunem că forțe diferite acționează asupra unor corpuri cu mase egale imprimîndu-le accelerațiile $a_1$ și respectiv $a_2$. Folosind aceeași relație (48) obținem

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{a_1}{a_2}.$$

Vom spune că *forțe diferite, acționînd asupra unor corpuri de mase egale, le imprimă accelerații direct proporționale cu forțele.*

Relația (48) este o ecuație vectorială. Ea poate fi înlocuită prin trei relații scalare de forma

$$F_x = ma_x, \quad F_y = ma_y, \quad F_z = ma_z,$$

unde $F_x$ reprezintă suma componentelor[1] după axa $Ox$ ale tuturor forțelor ce acționează asupra corpului de masă $m$,

[1] Vezi, de exemplu, *Fizica* de D. Halliday și R. Resnick, Editura didactică și pedagogică, București, 1975, p. 103.



$F_y$ suma componentelor după axa $Oy$ ale tuturor forțelor ce acționează asupra aceluiași corp și $F_z$ suma componentelor după axa $Oz$ ale tuturor forțelor care acționează asupra lui $m$, iar $a_x$, $a_y$, $a_z$ sînt componentele după axele de coordonate $Ox$, $Oy$, $Oz$ ale accelerației pe care o capătă corpul de masă $m$.

Dacă în relația (48) considerăm $F = 0$, atunci $a = 0$ și deci corpul se află fie în repaus, fie în mișcare cu viteză constantă. Aceasta înseamnă că legea fundamentală a dinamicii clasice cuprinde în ea și prima lege, *legea inerției.* Rezultă că numai legea forței este independentă, nu și legea inerției. Legea fundamentală a dinamicii clasice (newtoniene) este, în esență, *o definiție a forței.*

Masa corpului, definită ca mai sus, este numită *masă inertă.* Unitatea de măsură pentru masă în sistemul internațional de unități de măsură este kilogramul, definit ca *masa kilogramului internațional, prototip, de platină iridiată*[1], *adoptat în 1889 la Conferința generală de măsuri și greutăți de la Sèvres — Franța.* Ca unitate de măsură pentru forță se ia newtonul (N); el reprezintă *forța care, acționînd asupra unui corp cu masa de* 1 kg, *îi imprimă acestuia o accelerație de* 1 m/s²

$$1\ \text{N} = 1\ \text{kg} \cdot 1\ \text{m/s}^2.$$

Din experiența de toate zilele știm că orice corp lăsat liber în aer cade pe Pămînt. Aceasta se datorește faptului că asupra corpului respectiv acționează cîmpul gravitațional al Pămîntului. În cădere corpul descrie o traiectorie dirijată înspre centrul Pămîntului. Se spune că corpul este greu sau că are greutate. Dacă suspendăm un corp de un fir, atunci firul ia direcția perpendiculară pe suprafața solului, adică înspre centrul Pămîntului (firul cu plumb, de exemplu, folosit pentru a indica direcția verticală).

Să ne imaginăm acum că am suspendat un corp de masă $m$ de un resort elastic de lungime $l$. Resortul se alungește cu cantitatea $\Delta l$. Dacă suspendăm de același resort un corp cu masa de două ori mai mare, adică $2m$, atunci se observă că resortul se alungește cu cantitatea $2\Delta l$, deci de două ori mai mare decît în primul caz. Aceasta înseamnă că forța cu care cîmpul gravitațional terestru acționează asupra corpului de masă $2m$ este de două ori mai mare decît forța

[1] 90% platină și 10% iridium. Se adaugă iridium pentru a i se mări rezistența mecanică.

cu care acționează asupra corpului de masă $m$. Suspendînd acum un corp cu masa de 3, 4 ... sau de $n$ ori mai mare, alungirea resortului elastic va fi de același număr de ori mai mare, ceea ce înseamnă că forța cu care cîmpul gravitațional al Pămîntului acționează asupra corpului respectiv este de 3, 4, ..., $n$ ori mai mare decît forța cu care acționează asupra corpului de masă $m$.

Această constatare ne conduce la definirea greutății unui corp ca *forța cu care cîmpul gravitațional terestru acționează asupra acelui corp*, precum și la concluzia că *greutatea* corpului este proporțională cu masa lui. Factorul de proporționalitate este accelerația gravitațională $g$ și ea are același modul pentru toate corpurile aflate în același loc pe Pămînt.

Dar fenomenul acesta de atracție al unui corp de către Pămînt constituie un caz particular al gravitației universale (de fapt și corpul „atrage" Pămîntul, dar această atracție este neglijabilă). Masa despre care am vorbit mai sus nu este masa inertă, deoarece aici nu este cazul unui corp care capătă o accelerație sub acțiunea unei forțe ca în legea a doua a dinamicii, ci masa unui corp supus gravitației universale. Deci masa corpului cu care greutatea este direct proporțională este *masa gravifică* sau *masa grea*. Prin urmare, analizînd cele expuse mai sus, conchidem că masa unui corp oarecare se bucură de două proprietăți și anume: proprietatea de a fi *inertă* și proprietatea de a fi *grea*. Aceasta nu înseamnă însă că corpul are două feluri de masă, deoarece cele două proprietăți diferite aparțin aceleiași substanțe. De asemenea, conchidem că greutatea se datorește masei gravitaționale. În teoria relativității generale se demonstrează identitatea dintre masa inertă și masa grea. Prin urmare, cele două mase sînt identice și din acest motiv în mod curent nu se face deosebirea între masa inertă și masa grea, ci se spune pur și simplu, *masa corpului*.

Greutatea unui corp de masă $m$ se exprimă prin următoarea formulă

$$\vec{G} = m\vec{g}$$

unde $\vec{g}$ este *accelerația gravitațională*, adică accelerația corpului datorită forței gravifice, $\vec{G}$.

Întotdeauna sub acțiunea greutății sale $\vec{G}$, corpul capătă aceeași accelerație $\vec{g}$.



Forțele se măsoară cu instrumentele denumite *dinamometre*. Există *dinamometre cu lamă* sau *cu arc* (resort elastic) și *dinamometre hidraulice*. În figurile 41 și 42 se arată două tipuri de dinamometre, cu lamă și respectiv cu arc. Funcționarea se înțelege din figură. Dinamometrul este prevăzut

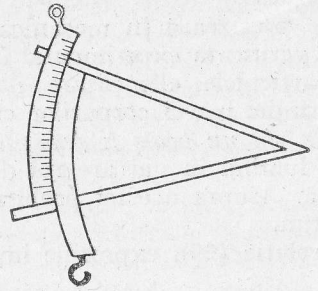


Fig. 41. Dinamometru cu lamă elastică.

Fig. 42. Dinamometru cu arc.

cu un ac indicator, care se deplasează în timpul funcționării pe o scală etalonată în unități de forță (nu intrăm în amănuntele constructive, deoarece nu acesta este scopul cărții de față); el arată deci fie forța cu care Pămîntul atrage corpurile, fie forța cu care se acționează asupra lor.

Masa corpurilor se măsoară cu *balanța*. Esența funcționării balanței este compararea masei necunoscute a unui corp (sau mai multe) cu masa cunoscută a altui corp, etalon. Cînd se stabilește echilibrul spunem că corpul are masa egală cu cea a corpului etalon, adică am efectuat o cîntărire.

Dacă o particulă de masă $m$ se află într-un referențial neinerțial, legea lui Newton se scrie adăugînd la forța $\vec{F}$, *forța de inerție* $\vec{F}_i$, care este denumită tot mai adesea *pseudoforță*. Vom avea deci

$$\vec{F} - \vec{F}_i = m\vec{a}.$$

În dinamica relativistă, masa particulei nu mai este o mărime constantă, ci o mărime variabilă, variația ei cu viteza fiind exprimată prin relația

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}; \qquad (49)$$

aceasta reprezintă *legea de variație a masei cu viteza*. Aici $m_0$ reprezintă masa particulei în repaus, $m$ masa particulei în mișcare cu viteza $v$, iar $\beta = \frac{v^2}{c^2}$.

Se observă că pentru $c = \infty$, $m = m_0 = \text{const}$. Aceasta înseamnă că masa este aceeași în toate sistemele de referință inerțiale, așa cum se precizează în mecanica newtoniană. Formula (49) a fost verificată experimental în numeroase rînduri, folosind particulele elementare de viteză foarte mare. Din legea variației masei corpurilor cu viteza rezultă că: *viteza luminii în vid nu poate fi depășită și deci este o viteză limită*; viteza luminii în vid are rol de viteză infinită în mecanica clasică. Asupra acestei probleme vom reveni la momentul oportun.

Dacă ținem seama de relația (49), expresiile impulsului și forței se scriu

$$\vec{p} = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}\vec{v}$$

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v}\frac{dm}{dt} \qquad (50)$$

sau

$$\vec{F} = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}\frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v}\frac{d}{dt}\left(\frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}\right).$$

Relația (50) exprimă *legea fundamentală a dinamicii relativiste.*

Din relația (49) rezultă că pentru $v = c$, $m = \infty$. Aceasta înseamnă că viteza $c$ nu poate fi atinsă. Cu toate acestea, trebuie să menționăm faptul că fizicianul american E.C.G. Sudarshan arăta, încă în anul 1932, că de fapt teoria relativității nu exclude posibilitatea existenței unor particule care să se deplaseze cu viteză mai mare decît viteza luminii în vid $c$, ci chiar sugerează acest lucru. Aceeași presupunere, adică posibilitatea existenței unor particule care să se deplaseze cu viteză mai mare decît $c$ o fac și alți fizicieni, între care fizicianul sovietic I.P. Terleţki și fizicianul american G. Feinberg. Această ipoteză, însă, a fost emisă cu mulți ani mai înainte și anume în anul 1904, de către fizicianul german Arnold Sommerfeld.



Așa cum se știe, lumina constă dintr-un flux de particule materiale denumite fotoni, a căror masă de repaus este nulă; viteza fotonilor este $c = 3 \cdot 10^8$ m/s (300 000 km/s). Cercetările au arătat, însă, că fotonii nu sînt particule privilegiate, în sensul că nu numai ei se mișcă cu viteza $c$, ci și alte particule, numite *neutrini*. Neutrinii sînt particule elementare cu masă neglijabilă și, așa cum rezultă și din denumire, neutri din punct de vedere electric. Ipoteza existenței neutrinilor a fost emisă în anul 1930 de către W. Pauli, iar existența lor a fost pusă în evidență, experimental, în anul 1956. Neutrinii și antiparticulele lor — antineutrinii — se emit simultan de către nucleele radioactive, dar ei apar și în timpul dezintegrării unor mezoni. Experimental s-a dovedit că neutrinii au o putere de pătrundere foarte mare. Toate stelele în care au loc reacții termonucleare, inclusiv Soarele (reacții prin care hidrogenul se transformă în heliu în prezența carbonului), emit și neutrini. Dacă ar exista antistele, atunci acestea ar emite antineutrini[1]. Pentru studiul radiației neutrinice și antineutrinice se preconizează folosirea unui „telescop neutrinic", a cărui construcție fiind extrem de dificilă, încă nu a fost realizat, dar este în curs de realizare. Este vorba despre telescopul neutrinic al lui Reines și Kropp[2].

S-a admis, prin convenție, că particulele care se deplasează cu viteză mai mică decît viteza luminii în vid să fie numite *particule normale* sau *particule de categoria I* sau, încă, *particule subluminoase*. Fotonii și neutrinii (și, eventual, gravitonul — încă nedescoperit) s-a convenit să fie numiți *particule de categoria II-a* sau *particule luminoase*. Aceste categorii de particule sînt înglobate în teoria relativității restrînse.

S-a presupus, însă, că ar putea exista și o a treia categorie de particule, „*supraluminoase*", adică particule care să se deplaseze cu viteză mai mare decît viteza luminii în vid ($v > c$). Existența unor astfel de particule nu vine în contradicție cu legile fundamentale ale fizicii ca legea conservării energiei sau principiul cauzalității. Sudarshan arată că teoria relativității restrînse se poate extinde și pentru particule supraluminoase, că, de fapt, existența acestor particule ar putea să rezulte din generalizarea naturală a acestei teorii, păstrîndu-se în continuare valabilitatea legilor de bază ale teoriei relativității restrînse. De aceea, Sudarshan a denumit această nouă teorie (adică teoria relativității restrînse extinsă la particule supraluminoase) *metarelativitate*.

---

[1] Vezi *Fizică modernă și filozofie* de T. Toró, Ed. „Facla", Timișoara, 1973, p. 110.

[2] Op. cit., p. 110.

Particulele supraluminoase au fost numite de către Feinberg *tahioni* (de la cuvîntul grecesc „tahios", care înseamnă *rapid, iute*). Pentru celelalte particule, Sudarshan a propus denumirile de: *luxoni* — particulele luminoase (fotoni, neutrini) și *tardoni* — particule subluminoase (de categoria I). Toate aceste denumiri, tahioni, luxoni și tardoni, încă nu sînt admise unanim de către oamenii de știință. Tahionii s-ar deosebi de luxoni și tardoni nu numai prin viteza lor, ci și prin masa proprie. Luxonii nu pot avea altă viteză decît $c$, în timp ce tardionii nu pot atinge viteza $c$; în ceea ce privește tahionii, ei nu ar putea avea o viteză $v < c$, ci numai $v > c$. Luxonii au masa de repaus $m_0$ egală cu zero, în timp ce tardonii au masă de repaus $m_0$ (denumită, încă, și masă proprie[1]), diferită de zero. Important este faptul că, în pofida acestor deosebiri dintre luxoni și tardoni, ambele feluri de particule satisfac aceleași legi relativiste.

Considerînd că tahionii există și că au $v > c$, în acest caz $\beta > 1$ și atunci vom scrie

$$\sqrt{(-1)\,(\beta^2 - 1)} = i\sqrt{\beta^2 - 1}$$

și deci relația (49), va deveni

$$m = \frac{m_0}{i\sqrt{\beta^2 - 1}}$$

sau

$$m = \frac{m^*}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \qquad (51)$$

unde

$$m^* = \frac{1}{i}\, m_0.$$

Se observă că masa de repaus $m_0$ este imaginară, iar masa relativistă a particulei în mișcare cu viteza $v > c$ este reală.

$m^*$ este valoarea absolută a lui $m_0$ și se numește *metamasă*. Formula (51) arată că pentru $v > c$, masa de mișcare $m$ este reală, în timp ce $m_0$ trebuie să fie imaginară. Faptul că $m_0$ este imaginară nu prezintă importanță, deoarece mărimile ce trebuie să fie reale (și sînt reale) sînt masa $m$ și energia particulei. Aceste mărimi se pot măsura experimental. În metarelativitate se păstrează nealterate legea energiei și legea masei din teoria relativității restrînse. În tabelul I se dau cele trei tipuri de particule și caracteristicile lor.

[1] Op. cit., p. 140.



TABELUL 1

| | Denumirea | Viteza $v$ | Masa de repaus, $m_0$ | Masa relativistă | Energia |
|---|---|---|---|---|---|
| I | TARDONI | $v < c$ | $m_0$, reală | $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}$ | $E = mc^2$ |
| II | LUXONI | $v = c$ | $m_0 = 0$ | $m = \dfrac{E}{c^2}$ | $E = mc^2$ |
| III | TAHIONI | $v > c$ | $m_0 = \mathrm{im}^*$ imaginară | $m = \dfrac{m^*}{\sqrt{\dfrac{v^2}{c^2} - 1}}$ | $E = mc^2$ |

O clasificare a particulelor elementare.

Tahionii, neputîndu-se deplasa decît cu $v > c$, au viteză limitată inferior, în sensul că $v$ nu poate fi egală sau mai mică decît viteza luminii în vid, $c$. Aceasta înseamnă că atît energia, cît și masa de mișcare și impulsul sînt reale. Dacă viteza $v$ crește, energia și masa particulei se micșorează. Într-adevăr

$$m = \frac{m^*}{\sqrt{\dfrac{v^2 - c^2}{c^2}}} = \frac{m^* c}{\sqrt{v^2 - c^2}}.$$

Se observă ușor că atunci cînd $v$ crește, $m$ se micșorează.

Unii fizicieni, ca germanul Koj, consideră că tahionii sînt același lucru cu *gravitonii* (gravitonii sînt particule ipotetice, cu masă de repaus și sarcină electrică nule și reprezintă cuantele cîmpului gravitațional). Cercetările teoretice întreprinse asupra cîmpului gravitațional au arătat că un cîmp gravitațional slab se poate propaga sub formă de unde, cu viteza egală cu viteza luminii în vid, $c$. Cuantificarea unui astfel de cîmp gravitațional a presupus existența unei particule elementare care a fost denumită *graviton*. Pînă în prezent, însă, nu a fost constatată în nici un fel prezența undelor gravitaționale sau a gravitonilor. Fizicianul sovietic D.D. Ivanenko arată că „teoria cuantică conduce cu necesitate la concluzia că este posibilă transformarea cîmpului gravitațional în alte cîmpuri, de exemplu, transformarea a doi gravitoni în doi fotoni sau într-o pereche electron-pozitron, fiind de asemenea posibile și transmutațiile inverse". Koj arată că dintr-un calcul

făcut de Laplace rezultă că viteza de interacțiune gravitațională trebuie să fie mult mai mare decît viteza luminii în vid și anume de 7 milioane de ori mai mare (pe această bază, Laplace a încercat să explice de ce perturbațiile seculare în mișcarea Lunii nu sînt accesibile observațiilor). Mai departe, Koj emite ipoteza conform căreia tahionul și gravitonul sînt una și aceeași particulă și că ar exista un gaz tahionic-gravitonic, care ar fi luat naștere atunci cînd a avut loc prima explozie universală[1] și că acest gaz ar exista pretutindeni. Un corp care s-ar deplasa prin acest gaz nu ar întîmpina rezistență, deoarece viteza lui este mică în comparație cu viteza tahionilor (gravitonilor) și apoi aceste particule supraluminoase ciocnesc corpul din toate părțile, efectul produs asupra corpului fiind nul. În continuare, Koj încearcă să explice fenomenul gravitației universale cu ajutorul ipotezei tahionilor arătînd că este în dezacord cu explicația dată de teoria relativității.

Se speră că într-un viitor mai mult sau mai puțin îndepărtat se va dovedi dacă ipoteza existenței tahionilor este compatibilă cu teoria relativității sau nu, ori dacă este în acord cu prezicerile noilor particule elementare.

În scopul descoperirii experimentale a tahionilor s-au făcut și se fac diverse cercetări, imaginîndu-se și construindu-se instalații complicate. Putem spune că s-a organizat o adevărată vînătoare a acestor particule.

Să dezvoltăm în serie o expresie matematică a legii variației masei cu viteza

$$m = m_0(1 - \beta^2)^{-1/2} \approx m_0\left(1 + \frac{1}{2}\beta^2\right) = m_0 + \frac{1}{2}m_0\beta^2$$

și să păstrăm numai primii doi termeni ai dezvoltării

$$m = m_0 + \frac{1}{2}m_0\beta^2 \quad \left(\beta = \frac{v}{c}\right).$$

Înmulțind relația cu $c^2$ avem

$$mc^2 = m_0c^2 + \frac{1}{2}m_0v^2$$

și deci

$$\frac{1}{2}m_0v^2 = mc^2 - m_0c^2 \qquad (52)$$

[1] Vezi „Revista de fizică și chimie" (seria B), nr. 4, anul VIII, aprilie, 1971, p. 125.



în care $\frac{1}{2}m_0v^2$ reprezintă energia „cîștigată" de particulă, din repaus pînă la viteza $v$, iar $m$ este exprimat prin relația (49).

În relația (52) mai sînt doi termeni și anume $mc^2$, care reprezintă o energie cinetică corespunzătoare mișcării particulei și termenul $m_0c^2$, care nu este nici energie cinetică, nici energie potențială, ci este o energie echivalentă masei de repaus a particulei. Prin urmare, masei de repaus a unei particule îi corespunde o energie echivalentă și, invers, energiei unei particule îi corespunde o masă echivalentă și anume masa de repaus a particulei respective. Așa fiind vom scrie

$$E_{m_0} = m_0c^2 \qquad (53)$$

deci

$$m_0 = \frac{E_{m_0}}{c^2}.$$

Expresia (53) este numită *relația lui Einstein* și exprimă *legea energiei*. Această relație stă la baza fizicii nucleare și, așa cum se obișnuiește să se spună, a revoluționat întreaga lume științifică.

Asupra acestei probleme vom reveni. Acum însă vom analiza modul de compunere a vitezelor în teoria relativității.

Formulele de transformare ale lui Galilei ne permit să stabilim legea de compunere a vitezelor în mecanica clasică, newtoniană. În acest scop vom apela la fig. 43, în care $S$

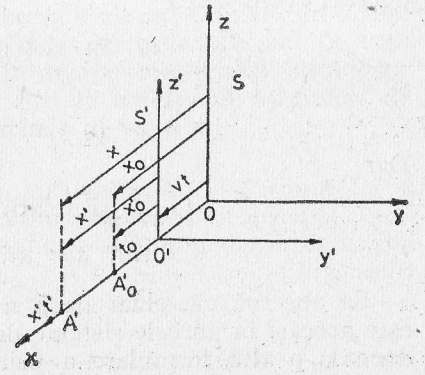



Fig. 43. Pentru înțelegerea compunerii vitezelor în mecanica clasică.

reprezintă sistemul de referință inerțial $xOyz$, iar $S'$ referențialul $x'O'y'z'$, în mișcare de translație uniformă față de $S$, cu viteza $v = \text{const}$. În $S'$ considerăm o particulă în mișcare față de $S'$, cu viteza $u$, iar față de $S$ cu viteza $w$. Trebuie să stabilim legătura între $u$, $v$ și $w$.

Cu notațiile de pe figura 43 putem scrie

$$u = \frac{x' - x'_0}{t' - t'_0}.$$

Folosind acum formulele de transformare ale lui Galilei (2), vom avea

$$u = \frac{x - vt - (x_0 - vt_0)}{t' - t'_0}.$$

Cum însă, $t' - t'_0 = t - t_0$ rezultă

$$u = \frac{x - x_0}{t - t_0} - v$$

sau

$$u = w - v$$

de unde

$$w = u + v. \qquad (54)$$

Expresia (54) reprezintă *legea de compunere a vitezelor în mecanica clasică, newtoniană.*

Să scriem acum legea spațiului pentru particula considerată; vom avea

$$s' = ut' \text{ în sistemul } x'Oy'z'$$

și

$$s = wt \text{ în sistemul } xOyz.$$

Dar

$$t = t' \text{ și relațiile devin}$$

$$s' = ut, \quad s = wt.$$

Se observă că, chiar dacă $u \neq w$, forma legii spațiului este aceeași în ambele sisteme de referință. Aceasta ne conduce la o altă formulare a principiului relativității al lui



Galilei și anume: *toate sistemele de referință aflate în mișcare de translație uniformă în raport cu un referențial inerțial sînt și ele inerțiale; legile mecanicii au aceeași formă în orice referențial inerțial; deci sistemele de referință inerțiale sînt echivalente între ele.*

Spuneam la începutul lucrării[1] că compunerea vitezelor în cinematica relativistă se face în cu totul alt mod decît în cinematica clasică, datorită faptului că în teoria relativității viteza luminii este o constantă universală, așa cum stipulează principiul al doilea al teoriei relativității restrînse.

Dar pentru a stabili legea de compunere a vitezelor avem nevoie de formulele de transformare ale lui Lorentz. Și, pentru că aceste formule conțin concentrată în ele întreaga teorie a relativității restrînse, le vom demonstra. Cititorul neinteresat în demonstrații se poate opri foarte bine la formulele finale și interpretarea lor.

Formulele de transformare menționate au fost demonstrate de către H.A. Lorentz, imediat după ce Michelson și Morley au făcut cunoscut lumii științifice rezultatul negativ al experienței pe care au efectuat-o. Dar atît autorul lor, cît și mulți alți fizicieni din acea vreme, le-au considerat ca pe niște speculații matematice amuzante. Formulele de transformare ale lui Lorentz au fost interpretate pentru întîia oară corect de către Einstein.

Einstein a arătat că ele corespund realității fizice și că reclamă o schimbare radicală a concepțiilor noastre despre spațiu, timp, mișcare.

Am arătat că în mecanica newtoniană trecerea de la coordonatele unui punct dintr-un sistem de referință inerțial la coordonatele aceluiași punct, dar în alt SRI, se face folosind formulele de transformare ale lui Galilei[2]. În aceste formule este cuprinsă și definiția timpului absolut pe care a dat-o Newton ($t = t'$). În teoria relativității formulelor de transformare ale lui Galilei le corespund formulele de transformare Lorentz-Einstein.

Fie două sisteme de referință inerțiale $S$ și $S'$, axele $Ox$ și $Ox'$ coincizînd (fig. 44). Pe axa $Ox$ considerăm un punct $A$. Celelalte axe sînt, evident, paralele între ele. Presupunem că la momentul $t = 0$ cele două origini $O$ și $O'$ coincid, iar în originea $O$

[1] Vezi p. 43.
[2] Vezi p. 20.

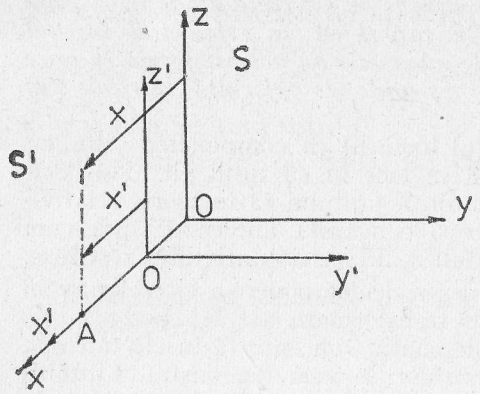



Fig. 44. Pentru demonstrarea formulelor de transformare Lorentz-Einstein.

se află o sursă de lumină punctuală. În momentul cînd se emite lumina, $S'$ se pune în mișcare față de $S$ cu viteza $v = \text{const}$. După timpul $t$ și respectiv $t'$, semnalul va fi recepționat în $A$, drumurile parcurse fiind

$$x = ct \text{ și } x' = ct'. \tag{55}$$

Deoarece punctul $A$ este unic în $S$, considerat fix (pentru a-l deosebi de $S'$ care se mișcă cu $v = \text{const.}$), în $S'$ îi va corespunde tot un punct și numai unul.

Punctul $A$ are coordonata $x$ în $S$ și $x'$ în $S'$. Dar $x$ depinde de $x'$ și $t'$ după cum $x'$ depinde de $x$ și $t$; dependența este liniară și, de aceea, vom scrie

$$x = a'x' + b't'$$

și

$$x' = ax + bt \tag{56}$$

$a$, $a'$, $b$ și $b'$ fiind coeficienți ce trebuie determinați. La timpul $t$, distanța dintre cele două origini $O$ și $O'$ este egală cu $vt$, adică originea $O'$ va avea față de $O$ coordonata $x = vt$, iar față de $O'$ coordonata $x' = 0$. Relația (56) devine

$$x' = a \cdot vt + bt = 0 \tag{57}$$

Scăzînd (57) din (56) avem

$$x' = ax + bt - a \cdot vt - bt$$

sau

$$x' = a(x - vt). \tag{58}$$

Dar, în acord cu principiul relativității dacă îl considerăm pe $S'$ fix și pe $S$ mobil cu viteza constantă $v$ trebuie să obținem



aceeași formulă. Așadar, va trebui să punem $x'$ în locul lui $x$ și $t'$ în locul lui $t$, deci

$$x = a(x' + vt') \tag{59}$$

de unde

$$t' = \frac{x - ax'}{av}$$

sau

$$t' = \frac{x - a^2(x - vt)}{av} = \frac{1 - a^2}{av}x + at$$

sau încă

$$t' = at - \frac{a^2 - 1}{av}x. \tag{60}$$

Relațiile (58) și (60) formează un sistem, care — ținînd seama de relațiile (49) — devine

$$t' = \frac{a(c - v)}{c}t$$

$$t' = at - \frac{a^2 - 1}{av}ct$$

sau

$$\frac{a^2v - a^2c + c}{av} = \frac{ac - av}{c} \Rightarrow a^2c^2 - a^2v^2 = c^2$$

de unde

$$a = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \tag{61}$$

Am luat valoarea pozitivă a lui $a$. Se observă că în relația (61), a apărut factorul de contradicție Lorentz.

Substituind pe $a$ în sistemul (58) și (59), obținem

$$x' = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}(x - vt)$$

$$t' = \frac{vt - \beta^2 x}{v\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Analog se obține

$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Acestea sînt

$$x = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}(x' + vt') \quad \text{sau} \quad x' = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}(x - vt)$$

$$y = y', \quad y' = y$$
$$z = z', \quad z' = z \tag{62}$$

$$t = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(t' + \frac{v}{c^2}x'\right), \quad t' = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(t - \frac{v}{c^2}x\right).$$

Formulele (62) sînt numite *formulele de transformare Lorentz-Einstein*. Lorentz le-a dedus, însă, pe baza altor considerente.

Dacă în formulele (62) facem $c = \infty$, atunci obținem

$$x = x' + vt' \qquad x' = x - vt$$
$$y = y' \qquad y' = y$$
$$\text{și} \tag{63}$$
$$z = z' \qquad z' = z$$
$$t = t' \qquad t' = t$$

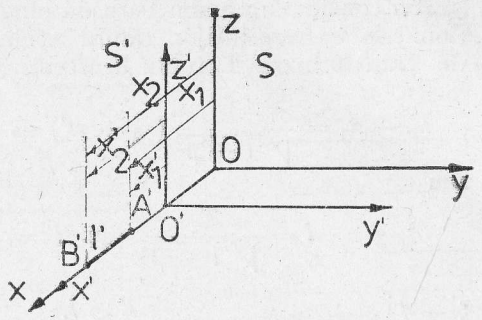
adică relațiile de transformare ale lui Galilei. Aceasta ne spune că în mecanica newtoniană viteza luminii în vid trebuie considerată ca o viteză infinit de mare. În cazul cînd $v \ll c$, atunci $\beta \approx 0$ și relațiile (62) trec în relațiile (63), adică se obțin din nou formulele de transformare ale lui Galilei. Aceasta înseamnă că mecanica newtoniană își păstrează valabilitatea numai în cazul fenomenelor care se desfășoară cu viteze mici în comparație cu viteza luminii în vid, adică pentru fenomene care se desfășoară în viața zilnică. De aceea, se spune că mecanica lui Newton este mecanica vitezelor mici. Ea își încetează valabilitatea atunci cînd este vorba despre microcosmos sau despre fenomenele care se produc în Cosmos. În aceste cazuri se aplică teoria relativității a lui Einstein.

Formulele de transformare Lorentz-Einstein conduc la unele consecințe surprinzătoare.

Astfel, să considerăm două sisteme de referință inerțiale $S$ și $S'$, $S'$ fiind în mișcare de translație uniformă cu viteza $v$



Fig. 45. Pentru demonstrarea contracției lungimilor.




față de $S$. În fiecare referențial vom presupune un observator, iar în $S'$ o bară de lungime $l'$, așezată în lungul axei $O'x'$ (fig. 45). Extremitățile barei vor avea coordonatele

$A'(x'_1, y'_1, z'_1)$, $B'(x'_2, y'_2, z'_2)$ în $S'$

$A(x_1, y_1, z_1)$, $B(x_2, y_2, z_2)$ în $S$.

Cum $y'_1 = y_1 = 0$, $z'_1 = z_1 = 0$, rezultă că lungimea barei va fi

$x'_2 - x'_1 = l'$ pentru observatorul din $S'$,

$x_2 - x_1 = l$ pentru observatorul din $S$.

Să aplicăm formulele de transformare Lorentz-Einstein. Vom scrie

$$x'_2 - x'_1 = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}(x_2 - vt) - \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}(x_1 - vt) =$$
$$= \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}(x_2 - x_1)$$

sau

$$l' = \frac{l}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad \text{sau} \quad l = \sqrt{1-\beta^2}\, l'$$

și deci

$$l < l'.$$

Aceasta înseamnă că observatorul din $S$ vede bara din $S'$ mai scurtă.

Să considerăm acum bara de lungime $l$ în $S$ și cum coordonatele extremităților rămîn aceleași, aplicînd formulele de transformare Lorentz-Einstein, vom avea

$$x_2 - x_1 = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}(x'_2 + vt') - \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}(x'_1 + vt')$$

sau

$$l = \frac{l'}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad \text{sau} \quad l' = \sqrt{1-\beta^2}\, l$$

și deci

$$l' < l.$$

Din cele de mai sus se observă că avem de a face cu contracția Lorentz-Fitzgerald și că această contracție este reciprocă. Conchidem că *întotdeauna lungimea cinematică este mai mică decît lungimea proprie (statică) și că un observator aflat într-un SRI constată, în toate celelalte sisteme de referință inerțiale în mișcare față de sistemul său, o contracție a dimensiunilor longitudinale ale tuturor corpurilor, proporțională cu factorul* $\sqrt{1-\beta^2}$.

Un observator care participă la mișcare poate măsura cu ușurință lungimea barei aflate în sistemul său de referință. Este suficient să așeze metrul și să vadă de cîte ori se cuprinde în bara considerată. Simplu; dar pentru observatorul care se află în alt sistem și care constată că bara s-a scurtat este foarte dificil să facă măsurătoarea. Pentru măsurarea ei trebuie să ia în sistemul său două puncte care să corespundă simultan extremităților barei din celălalt sistem și apoi să măsoare distanța dintre acele puncte; va obține astfel lungimea contractată care va fi mai mică decît lungimea din sistemul său. Noțiunea de simultaneitate o vom discuta mai tîrziu.

Alte exemple pot fi următoarele.

Să presupunem două sisteme de referință inerțiale în mișcare unul față de altul ca în figura 46 și în fiecare din ele cîte un geometru care a desenat cîte un pătrat și un cerc. Fiecare va spune despre figurile celuilalt că reprezintă un dreptunghi și o elipsă. Evident, amîndoi au dreptate, fiindcă fiecare vede figurile desenate în alt referențial.

Să ne imaginăm două balize și între ele un automobil-rachetă. Distanța dintre balize s-o considerăm egală cu lungimea automobilului-rachetă (fig. 47, a), egală cu 8 metri, iar viteza automobilului o vom presupune egală cu 180 000 km/s.



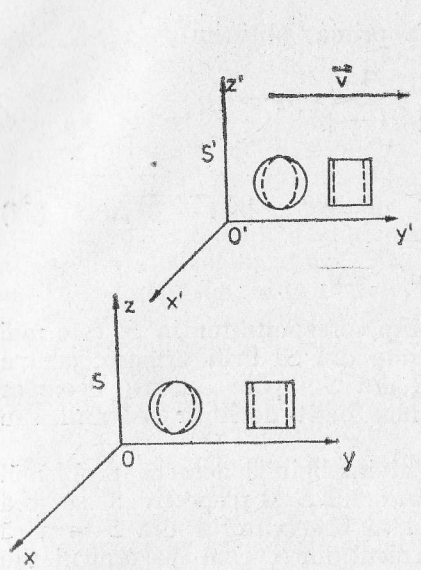



Fig. 46. Efectul contracției lungimilor.

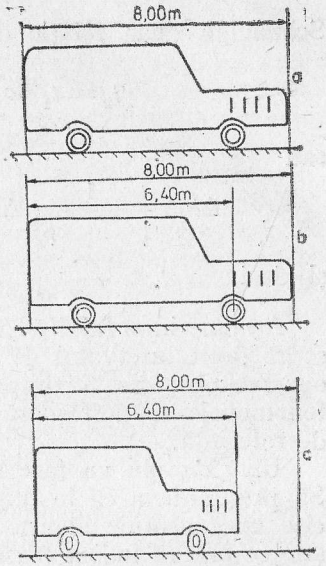



Fig. 47. Efectul contracției lungimilor.

Cînd automobilul trece prin dreptul balizelor, șoferul va vedea ceea ce se arată în figura 47, b și va spune că balizele s-au apropiat, iar un observator aflat în apropierea balizelor va vedea ceea ce se arată în figura 47,c și va exclama că automobilul s-a contractat. Desigur, fiecare din cei doi observatori are dreptate, deoarece descrie fenomenul așa cum îl vede din sistemul său de referință.

Să discutăm o altă consecință a teoriei relativității, care a suscitat numeroase discuții în lumea științifică. Este vorba despre *dilatarea timpului*. Să presupunem că observatorul din $S$ măsoară intervalul de timp în care se desfășoară un eveniment găsindu-l $\Delta t = t_2 - t_1$ și dorește să știe ce interval de timp va corespunde în $S'$, în punctul $M'$ $(x', y', z')$, interval pe care-l vom nota cu $\Delta t' = t'_2 - t'_1$. Aplicăm relația de transformare a timpului din teoria relativității restrînse

$$t_2 = \frac{t'_2 + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad \text{și} \quad t_1 = \frac{t'_1 + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Scăzînd a doua relație din prima, obținem

$$t_2 - t_1 = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}(t'_2 - t'_1)$$

sau

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}\Delta t' \quad \text{or} \quad \Delta t' = \sqrt{1-\beta^2}\,\Delta t \qquad (64)$$

și deci $$\Delta t' < \Delta t.$$

Așadar, intervalul de timp corespunzător în $S'$ este mai scurt decît intervalul de timp din $S$. Prin urmare, pentru observatorul din $S$ timpul din $S'$ apare dilatat, deoarece fenomenele se desfășoară mai încet decît în sistemul său de referință.

Un exemplu va face mai inteligibilă această problemă. Să presupunem că în originea lui $S$ și respectiv $S'$ se află cîte un ceasornic identic și că observatorul din $S$ vrea să știe ce oră va indica ceasornicul din $S'$ cînd ceasornicul său indică orele: 0, 1, 2, ...; $S'$ se mișcă cu $v = \text{const.} = 240\,000$ km/s. Vom avea deci $\Delta t = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots$ și aplicînd (64) vom scrie

$$\Delta t' = \sqrt{1-\beta^2}\,\Delta t = \sqrt{1-\left(\frac{240\,000}{300\,000}\right)^2}\,\Delta t$$

sau $$\Delta t' = 0{,}6\ \Delta t.$$

Înlocuim pe $\Delta t$ și obținem

$$\Delta t' = 0^h\ 36^{min},\ 1^h\ 12^{min},\ 1^h\ 48^{min},\ 2^h\ 24^{min},\ 3^h, \ldots$$

Așadar, în timp ce ceasul său indică de exemplu ora 2, ceasul din $S'$ indică (vede el) ora 1 și 12 minute ș.a.m.d.

În concluzie, un observator aflat într-un sistem de referință inerțial constată în toate celelalte referențiale inerțiale, în mișcare de translație uniformă față de sistemul său, două fenomene curioase: *contracția lungimilor* și *dilatarea timpului*.

Înainte de a trece mai departe, la altă consecință a formulelor de transformare, considerăm necesar să facem o precizare. Am arătat că ipoteza contracției a fost introdusă de către Lorentz și Fitzgerald, dar că ea nu a fost verificată practic prin nici o experiență, oricît de sensibilă, iar aici



apare din nou fenomenul contracției și este admis în teoria relativității restrînse. Este oare vreo revenire sau vreo contradicție? Nicidecum; după Lorentz și Fitzgerald, așa cum am arătat la momentul oportun, contracția trebuie să apară ca atare, adică și pentru observatorul care ia parte la mișcare și, de aceea, nu a fost verificată experimental. În teoria relativității restrînse, însă, contracția lungimilor apare ca o consecință a stării de mișcare a referențialului în care se află observatorul. Dar fenomenul nu este observat în sistemul său, ci în toate celelalte referențiale inerțiale în mișcare de translație uniformă față de referențialul său.

O altă consecință a formulelor de transformare o constituie *relativitatea simultaneității*. Să ne imaginăm o oglindă unghiulară ca în fig. 48, în $A$ și $B$ cîte un ceasornic identic, iar în $O$ un observator. Dacă ambele ceasornice arată, pentru $O$, aceeași oră cu maximum de precizie, se spune că ele sînt sincronizate. Presupunem că în $A$ și $B$ se produc niște evenimente. Dacă aceste evenimente au loc la aceeași oră marcată pe ceasornicele sincronizate se spune că evenimentele sînt simultane.

Să presupunem acum că într-un sistem de referință inerțial se produc simultan două evenimente în locuri diferite $x_1 \neq x_2$. Evenimentele fiind simultane, înseamnă că $t_2 = t_1$. Fie acum un alt sistem inerțial în mișcare de translație uniformă față de primul sistem, și în el un observator. Observatorul din acest al doilea sistem va vedea că evenimentele din primul se desfășoară succesiv! Deci, pentru el evenimentele nu mai apar simultan! Să scriem relația de transformare a timpului pentru observatorul din $S'$

$$t'_1 = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(t_1 - \frac{v}{c^2}\,x_1\right) \quad \text{și} \quad t'_2 = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(t_2 - \frac{v}{c^2}\,x_2\right)$$

cum $x_1 \neq x_2$ și $t_1 = t_2$, rezultă $t'_1 \neq t'_2$.

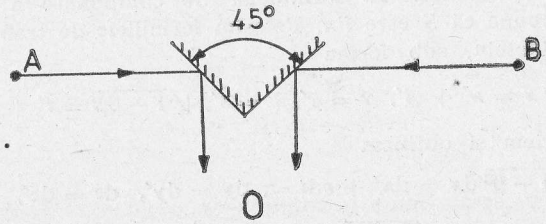



Fig. 48. Pentru definirea simultaneității.

Prin urmare, *simultaneitatea evenimentelor este relativă*, ca și spațiul și timpul. Evenimentele simultane într-un sistem de referință inerțial $S$ sînt succesive pentru observatorii aflați în toate celelalte referențiale inerțiale, care se mișcă rectiliniu și uniform față de primul. Invers, evenimentele simultane din toate celelalte sisteme apar succesive în sistemul $S$.

Tot cu ajutorul formulelor de transformare Lorentz-Einstein se poate arăta că nu se poate schimba ordinea de succesiune în timp a două evenimente, acestea fiind legate cauzal unul de celălalt.

Cu aceste noțiuni, putem trece la compunerea vitezelor în mecanica relativistă.

Să considerăm două sisteme de referință inerțiale $S$ și $S'$ și într-unul dintre sisteme, de exemplu în $S'$, un punct material $P$ în mișcare cu viteza $u'$. Vom presupune că $S'$ se mișcă față de $S$ în lungul axei $Ox$ (deci $Ox$ coincide cu $O'x'$). Vrem să determinăm viteza $u$, a aceluiași punct, față de sistemul $S$.

Vom nota cu $u'_x$, $u'_y$, $u'_z$ proiecțiile lui $\vec{u}'$ pe cele trei axe de coordonate ale lui $S'$ și cu $u_x$, $u_y$, $u_z$ proiecțiile vitezei $\vec{u}$ pe axele $Ox$, $Oy$, $Oz$. Legătura dintre componentele lui $\vec{u}$ și respectiv $\vec{u}'$ sînt date de relațiile

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2} u'_x}; \quad u_y = \frac{u'_y}{1 + \frac{v}{c^2} u'_x}, \quad u_z = \frac{u'_z}{1 + \frac{v}{c^2} u'_x}.$$

Aceste trei relații exprimă *legea de compunere a vitezelor în mecanica relativistă (restrînsă)*. Se observă că intervine $c$, care este o *constantă universală*.

Pentru demonstrarea formulelor de compunere a vitezelor vom presupune că $S$ este fix. Folosim formulele de transformare Lorentz-Einstein, sub forma

$$\sqrt{1-\beta^2}\, x = x' + vt', \; y = y', \; z = z', \; \sqrt{1-\beta^2}\, t = t' + \frac{v}{c^2} x';$$

le diferențiem și obținem

$$\sqrt{1-\beta^2}\, dx = dx' + v dt' =, \; dy = dy', \; dz = dz',$$

$$\sqrt{1-\beta^2}\, dt = dt' + \frac{v}{c^2} dx'.$$



Împărțind primele trei relații la a patra, rezultă

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx' + v dt'}{dt' + \frac{v}{c^2} dx'}, \quad \frac{dy}{dt} = \frac{dy'}{dt' + \frac{v}{c^2} dx'}, \quad \frac{dz}{dt} = \frac{dz'}{dt' + \frac{v}{c^2} dx'}.$$

Împărțind apoi și numărătorul și numitorul membrului al doilea cu $dt'$ avem

$$\frac{dx}{dr} = \frac{\frac{dx'}{dt'} + v}{1 + \frac{v}{c^2} \cdot \frac{dx'}{dt'}}; \quad \frac{dy}{dt} = \frac{\frac{dy'}{dt'}}{1 + \frac{v}{c^2} \cdot \frac{dx'}{dt'}}, \quad \frac{dz}{dt} = \frac{\frac{dz'}{dt'}}{1 + \frac{v}{c^2} \cdot \frac{dx'}{dt'}};$$

dar

$$\frac{dx}{dt} = u_x, \quad \frac{dy}{dt} = u_y, \quad \frac{dz}{dt} = u_z$$

și

$$\frac{dx'}{dt'} = u'_x, \quad \frac{dy'}{dt'} = u'_y, \quad \frac{dz'}{dt'} = u'_z.$$

Cu acestea se obțin formulele de compunere a vitezelor în mecanica relativistă.

Să presupunem acum cazul particular cînd particula considerată se mișcă paralel cu axa $O'x'$ cu viteza $u'_x = w$. În aceste condiții, $u'_y = 0$, $u'_z = 0$ și relațiile devin

$$u_x = \frac{w + v}{1 + \frac{v}{c^2} w}, \quad u_y = 0, \quad u_z = 0.$$

De aici rezultă că viteza rezultantă a punctului în sistemul $S$ va fi (notînd $u_x = u$)

$$u = \frac{v + w}{1 + \frac{v}{c^2} w}.$$

Aceasta este *legea de adunare a două viteze*, $v$ și $w$, care au aceeași direcție și același sens.

Să dăm cîteva exemple. Presupunem că $w = \frac{2}{3}c$. Aplicînd ultima relație găsim

$$u = \frac{v + \frac{2}{3}c}{1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{c}{c^2} c} = c.$$

Pentru $w = c$,

$$u = \frac{v + c}{1 + \frac{v}{c^2} c} = c.$$

Dacă $v = c$ și $w = 0$

$$u = c.$$

Pentru $c = \infty$

$$u = v + w.$$

Am obținut legea de adunare a vitezelor din mecanica clasică. Dacă $w = -w$, atunci: $u = \frac{v - w}{1 - \frac{v}{c^2} w}$ și pentru $c = \infty$, $u = v = -w$, iar pentru $w = -w$ și $v = c$, $u = \frac{c - w}{1 - \frac{c}{c^2} w} = c$.

Acesta este cazul cînd vitezele care se însumează au sensuri opuse, dar aceeași direcție.

Din cele de mai sus rezultă că *viteza luminii este o viteză limită superioară*, viteză care nu poate fi depășită. Rezultă, de asemenea, că *viteza luminii este o constantă* și că în mecanica newtoniană, $c$ are rol de viteză infinită.

## LEGEA GRAVITAȚIEI UNIVERSALE

O serie de fenomene din natură au loc sub influența forțelor gravitației universale. Așa, de exemplu, sînt: căderea liberă a corpurilor pe Pămînt, mișcarea Lunii în jurul Pămîntului, mișcarea planetelor în jurul Soarelui.



Din cele mai vechi timpuri și pînă în secolul al XVII-lea, greutatea era considerată ca o proprietate inerentă a tuturor corpurilor, fără a fi necesară vreo explicație. Căderea corpurilor a început să fie privită ca datorîndu-se unei forțe de atracție dintre Pămînt și corpuri începînd din secolul al XVII-lea, de către Newton, Hooke ș.a. Multe discuții s-au iscat în legătură cu problema mișcării Lunii în jurul Pămîntului, a planetelor în jurul Soarelui, cu privire la problema gravitație .

Cele mai vii discuții s-au purtat la Cambridge, în anul 1664, de studenții în filozofia naturii. Printre ei se afla și Isaac Newton, care la acea vreme avea vîrsta de 23 de ani. Se spune (după Voltaire) că într-una din zile Newton, în timp ce se plimba prin grădina sa, a văzut un măr căzînd din pom; atunci își puse următoarea întrebare: „...care sînt limitele forței gravitaționale și cît de înalt ar trebui să fie pomul pentru ca mărul să nu mai cadă pe Pămînt?"[1] Newton a ajuns la concluzia că, chiar dacă vîrful pomului ar ajunge pînă la Lună, acțiunea gravitației nu ar înceta. În acest scop el a trebuit să arate deosebirea care există între accelerația gravitațională $g_0$ la suprafața solului, deci la distanța $R$ de centrul Pămîntului și accelerația gravitațională la depărtarea $D = 60R$, adică la o distanță egală cu aceea dintre centrul Pămîntului și al Lunii. Newton cunoștea care este distanța Pămînt-Lună și viteza Lunii în jurul Pămîntului și cu aceste date trebuia să calculeze accelerația centripetă $v^2/D$ a Lunii în mișcarea ei în jurul Pămîntului. El a obținut pentru $v^2/60R$ valoarea 0,0027 m/s$^2$. Însă $g$ la suprafața solului este de aproximativ 3 600 ori mai mare decît $v^2/D$. Newton a conchis că $g$ scade cu creșterea distanței față de centrul Pămîntului. Urma, evident, să stabilească relația care exprimă această scădere. Cum $D = 60R$, iar $3\,600 = 60^2$, Newton a tras concluzia că $D$ crește de 60 ori, iar $g$ scade de $60^2$ ori. În acest mod, Newton a conchis că accelerația gravitațională $g$ și, prin urmare, forța de atracție variază invers proporțional cu $D^2$. Dar el știa că forța este direct proporțională cu masa $m$ a corpului aflat în cîmpul gravitațional. Așa fiind, Pămîntul atrage corpul considerat cu o forță direct proporțională cu masa

[1] *Principiile matematice ale filozofiei naturale* de Isaac Newton traducere din limba engleză, Editura Academiei R.P.R., București, 1956, p. 428.

lui, iar corpul atrage Pămîntul cu o forță direct proporțională cu masa $M$ a Pămîntului. Fiind vorba de o acțiune și o reacțiune, forțele sînt identice și, ca atare, trebuie ca forța de atracție reciprocă să fie proporțională cu produsul maselor $(mM)$. Deci, trebuie să scriem

$$F = k\frac{mM}{R^2}. \tag{65}$$

Relația (65) exprimă *legea gravitației universale* sau *legea atracției universale a lui Newton* și este valabilă pentru orice pereche de corpuri din univers. Din (65) rezultă că *modulul forței de atracție reciproce dintre două corpuri este direct proporțional cu produsul maselor lor și invers proporțional cu pătratul distanței dintre ele.* Corpurile se consideră cu dimensiuni transversale mici în comparație cu distanța dintre ele. Această concluzie îndrăzneață a zguduit lumea științifică din acea vreme și de mai tîrziu. Dacă dimensiunile transversale ale corpurilor sînt mari în comparație cu distanța dintre ele, atunci fiecare corp trebuie considerat ca descompus în corpuri mici, dar cu dimensiuni transversale finite, de masă $\Delta m_i$ și respectiv $\Delta m_k$ și modulul forței de atracție reciprocă se scrie

$$\Delta F_{ik} = k\frac{\Delta m_i \Delta m_k}{R_{ik}^2},$$

iar modulul forței totale de interacțiune

$$F = \Sigma \Delta F_{ik}. \tag{66}$$

Pentru corpuri sferice calculul lui $F$ este foarte simplu; el diferă de la corp la corp, depinzînd de caracteristicile corpului. Pentru cazul a două sfere omogene de masă $m_1$ și respectiv $m_2$,

$$F = k\frac{m_1 m_2}{R^2}$$

$R$ fiind distanța dintre centrele lor de simetrie. Cînd se calculează modulul forței de interacție dintre două corpuri de o formă oarecare, se aplică relația (66), $R$ fiind în acest caz distanța dintre centrele lor de masă.



Vectorial, expresia legii gravitației universale se scrie

$$\vec{F} = k\frac{mM}{R^2}\cdot\frac{\vec{R}}{R}, \tag{67}$$

$\frac{\vec{R}}{R}$ fiind versorul lui $\vec{R}$ și deci $\vec{F}$ are aceeași orientare ca și $\vec{R}$.

În secolele al XVIII-lea și al XIX-lea, unii fizicieni au acceptat concepția idealistă a „acțiunii la distanță", adică faptul că spațiul dintre corpuri nu ar avea nici un rol. Realitatea este, însă, cu totul alta. Orice corp, indiferent de forma, natura sau dimensiunile lui, generează în jurul său un cîmp denumit *cîmp gravitațional* sau *cîmp gravific*. Acest cîmp modifică unele proprietăți ale spațiului din jurul corpului. Tocmai prin aceasta este pus în evidență cîmpul gravitațional. Cîmpul gravitațional generat de Pămînt este numit *cîmp gravitațional terestru*. Ținînd seama de acestea, vom spune că fenomenul de atracție reciprocă dintre corpuri are loc ca urmare a interacțiunii corpurilor respective cu cîmpurile pe care le generează.

Orice cîmp gravitațional este caracterizat în fiecare din punctele sale prin mărimea fizică numită *intensitate a cîmpului*, care se notează de obicei cu $\vec{H}$ și se definește ca *raportul dintre forța cu care cîmpul gravitațional acționează în punctul considerat asupra unui corp de masă m și masa acelui corp, numit corp de probă.* Astfel, în cazul cîmpului gravitațional terestru vom scrie

$$\vec{H} = \frac{\vec{G}}{m}. \tag{68}$$

Deoarece $\vec{G} = \vec{F}$ substituim pe (67) în (68) și obținem

$$\vec{H} = k\frac{M}{R^2}\cdot\frac{\vec{R}}{R}. \tag{69}$$

Considerînd Pămîntul și un punct la înălțimea $h$ față de nivelul mării, modulul lui $H$, din (69), se scrie

$$|\vec{H}| = k\frac{M}{(R_0 + h)^2} \text{ sau } |\vec{H}| = |\vec{g}|;$$

$g$ este accelerația gravitațională în punctul considerat, iar $R_0$ raza Pămîntului. Așadar, intensitatea cîmpului gravitațio-

nal terestru într-un punct la înălțimea $h$ față de nivelul mării este numeric egală cu valoarea accelerației gravitaționale în acel punct. De exemplu, pe sol ($h = 0$) la poli $H = 9{,}83$ N/kg, iar $g$ în același punct este 9,83 m/s²; la ecuator, $H = 9{,}78$ N/kg; $g = 9{,}78$ m/s². În fine, la București, $H = 9{,}80565$ N/kg, $g = 9{,}80565$ m/s². Nu trebuie să se confunde accelerația gravitațională cu intensitatea cîmpului gravitațional!

Dacă analizăm puțin legea gravitației universale deducem că în apropierea suprafeței Pămîntului corpurile aflate la distanțe egale de centrul acestuia cad cu accelerații egale. Că e așa se poate demonstra cu mare ușurință. Fie un corp de masă $m$ în apropierea suprafeței solului; asupra lui acționează forța $\vec{G}$, adică forța de atracție a Pămîntului, imprimîndu-i accelerația

$$g = \frac{G}{m}. \tag{70}$$

Substituind (65) în (70), obținem

$$g = k\frac{mM}{mR_0^2} = k\frac{M}{R_0^2} = g_0.$$

Dar aici toate mărimile sînt constante; urmează că pentru toate corpurile din apropierea suprafeței solului terestru vom avea accelerația

$$g_0 = k\frac{M}{R_0^2}. \tag{71}$$

Cele expuse aici sînt valabile în absența forțelor de frecare. Pentru un corp aflat la înălțimea $h$ față de nivelul mării, deci la distanța $R = R_0 + h$ față de centrul Pămîntului,

$$g = k\frac{M}{(R_0 + h)^2}. \tag{72}$$

Fie un corp de masă $m$ la o înălțime $h$ față de nivelul mării (fig. 49). Considerînd Pămîntul descompus în mase finite de mărime $\Delta M$, masele fiind simetric distribuite în raport cu linia care unește centrul corpului cu centrul Pămîntului, toate forțele de atracție aplicate corpului vor fi dirijate spre Pămînt, iar rezultanta va fi dirijată spre centrul Pămîntului și este dată de



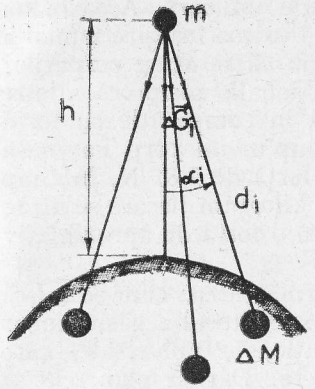



Fig. 49. Forța de atracție gravitațională este rezultanta forțelor cu care acționează masele elementare care alcătuiesc Pămîntul.

$$G = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta G_i = \sum_{i=1}^{i=n} k\frac{\Delta M m}{d_i^2}\cos\alpha_i$$

sau, punînd

$$g = \sum_{1}^{n} k\frac{\Delta M}{d_i^2}\cos\alpha_i \tag{73}$$

vom avea

$$G = mg_i^2$$

de aici

$$g = \frac{G}{m}.$$

$g$ reprezintă accelerația căderii libere a corpurilor (se face abstracție de forțele de frecare). Din relația (73) se observă că $g$ nu depinde de masa corpului, ci numai de distanța $d_i$ la care se găsește corpul față de masele $\Delta M$.

Se pune o întrebare firească: oare, într-adevăr, toate corpurile se atrag gravitațional între ele? Am spus că întrebarea este firească, deoarece nimeni nu a observat că două corpuri oarecare din cele înconjurătoare se atrag dacă nu intervine vreo forță de altă natură (de exemplu, electrică). Dar, în timp, fiecare am observat că Pămîntul atrage orice corp. De aceasta nu se îndoiește nimeni, deoarece fiecare dintre

noi a văzut, de exemplu, cum cade un corp. Aceasta nu înseamnă, însă, că atracția gravifică este o însușire numai a Pămîntului. Dar, de ce nu observăm că se atrag corpurile? Fiindcă forța de atracție gravitațională reciprocă dintre două corpuri este extrem de mică în comparație cu forța de atracție a Pămîntului. De exemplu, un corp cu masa de 1 kg este atras de Pămînt cu o forță de 9,81 N, în timp ce două corpuri cu masa de cîte un kilogram fiecare se atrag cu o forță de $6{,}67 \cdot 10^{-11}$ N, adică cu o forță de aproximativ o sută de miliarde de ori mai mică.

O altă întrebare firească este următoarea: cum se mișcă planetele în jurul Soarelui? Desigur, cititorul a găsit singur răspunsul. Datorită forței gravitaționale universale, care acționează și între Soare și planete. Dar și planetele se atrag reciproc. De exemplu, în prima jumătate a secolului trecut astronomii observaseră că ultima planetă cunoscută pe atunci, Uranus, prezenta abateri de la traiectoria sa. S-a presupus că ar exista o altă planetă care influențează mersul lui Uranus. Doi astronomi, Adams (Anglia) și Le Verrier (Franța), au calculat depărtarea și poziția acestei planete, iar astronomul italian Galle a descoperit-o în anul 1846 exact în locul prezis prin calcul. Această planetă a fost numită Neptun și se spune că a fost descoperită „în vîrful peniței". În mod similar a fost descoperită planeta Pluton, în anul 1930. Așadar, și planetele se atrag reciproc. Însă, există o atracție reciprocă și între Lună și Pămînt, între Lună și Soare ș.a.m.d. Deoarece masa Soarelui este incomparabil mai mare decît masa planetelor, atracția reciprocă dintre planete este mică; totuși, mișcarea fiecărei planete este ușor perturbată. Cu toate acestea, fiecare planetă se mișcă în jurul Soarelui sub acțiunea forței gravitaționale a acestuia ca și cum celelalte planete nu ar exista. Așadar, legile mișcării unei planete în jurul Soarelui rezultă din legea gravitației universale.

Dar, din punct de vedere istoric, lucrurile stau altfel. În secolul al XVI-lea, Tycho Brahe (1548—1601) a adunat o multitudine de date asupra mișcării planetelor, date care au fost analizate și interpretate abia după 20 de ani de către asistentul său, astronomul german Kepler, care a stabilit legile mișcării planetelor.

Brahe a fost ultimul mare astronom care a făcut observații în scopul obținerii de date astronomice fără ajutorul vreunui telescop. Am spus ultimul, deoarece după 8 ani de



la moartea sa, Galileo Galilei inventează telescopul refractor, denumit ulterior *lunetă Galilei*, cu un grosisment de 30 × cu ajutorul căreia a descoperit fazele planetei Venus, primii patru sateliți ai lui Jupiter, munții lunari, petele solare. Mai tîrziu, în a doua jumătate a secolului XVII, este inventat telescopul reflector cu viziune laterală, de către Isaac Newton, denumit ulterior *telescopul cu oglindă al lui Newton*.

Johannes *Kepler* (1571—1630), astronom și matematician german, considerat ca fondator al astronomiei moderne. În anul 1600 și-a început activitatea, la Praga, alături de astronomul Tycho Brahe. Un an mai tîrziu, acesta din urmă moare și Kepler îi ia locul în calitate de astronom al împăratului Rudolf al II-lea. Kepler a descoperit legile de mișcare ale planetelor (legile lui Kepler).

Primele două legi (sînt trei în total) le-a publicat în cartea sa „Astronomia nova", apărută în anul 1609. Cea de-a treia lege a publicat-o în 1619, în lucrarea intitulată „Harmonices mundi", iar o altă lucrare a sa din domeniul astronomiei o constituie așa numitele „Tabele rudolfiene", tabele întocmite de el și care cuprind efemeridele planetelor. Kepler a făcut și cercetări de optică. A inventat luneta care-i poartă numele și a cărei teorie o dă în lucrarea sa „Dioptrice", apărută în anul 1611.

Legile mișcării planetelor descoperite de Kepler au constituit o contribuție însemnată, hotărîtoare, la desăvîrșirea sistemului heliocentric al lui Copernic.

Pe baza datelor adunate de Brahe și de către el personal, Kepler stabilește legile mișcării planetelor. Acestea sînt:

— *legea orbitelor:* toate planetele se mișcă în jurul Soarelui pe orbite (traiectorii) eliptice, în focarul comun fiind Soarele;

— *legea ariilor:* raza vectoare care unește Soarele cu o planetă mătură (descrie) arii egale în intervale de timp egale;

— *legea perioadelor:* pătratul perioadei de revoluție a unei planete în jurul Soarelui este direct proporțional cu cubul distanței medii a planetei pînă la Soare.

Legile empirice ale lui Kepler arată cît de simplu se poate studia mișcarea planetelor dacă se ia Soarele drept corp de referință. De aceea, ele vin în sprijinul teoriei lui Copernic cu privire la sistemul Lumii (sistemul solar). Giordano Bruno și Galilei au fost aprigi apărători ai teoriei copernicane și fiecare dintre ei a suferit prigoana Inchiziției din vremea lor.

Pe baza materialului faptic adunat de astronomi pînă la el și avînd și legile lui Kepler, Newton a stabilit legea gravitației universale, arătînd și de ce anume depind forțele de gravitație. De asemenea, a arătat că corpurile cad din cauză că asupra lor acționează cîmpul gravitațional al Pămîntului, greutatea corpurilor reprezentînd forța cu care cîmpul gravitațional acționează asupra lor[1]. În aceasta constă marele merit al lui Newton.

Fiecare dintre noi știe că astăzi se transmit programe de televiziune prin sateliți artificiali ai Pămîntului (de asemenea, se transmit și convorbiri telefonice). Satelitul artificial care retransmite este un satelit „suspendat", *geostaționar*, adică un satelit care „stă" tot timpul în același punct deasupra suprafeței Pămîntului. Dacă se află la mare înălțime față de Pămînt, atunci frecarea este neglijabil de mică. Dar, pentru ca acest satelit să stea „suspendat", cum am spus mai sus, el trebuie să se rotească în jurul Pămîntului cu o perioadă de 24 ore, adică să aibă aceeași perioadă ca și Pămîntul în mișcarea sa de rotație (în jurul propriei sale axe). Să vedem, însă, la ce înălțime față de suprafața mării va trebui să se afle satelitul pentru ca frecarea să fie neglijabil de mică, adică, practic, nulă. Dacă notăm cu $v$ viteza tangențială a satelitului atunci vom avea

$$v = \frac{2\pi R}{T},$$

unde

$$R = R_0 + h,$$

$R_0$ fiind raza Pămîntului, iar $h$ înălțimea la care se află satelitul față de nivelul mării. Accelerația centripetă a satelitului este

$$a_c = \frac{v^2}{R} = \frac{\omega^2 R^2}{R} = \omega^2 R, \quad \text{cu} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Accelerația gravitațională la nivelul suprafeței Pămîntului se exprimă prin relația (71), iar accelerația gravitațională la distanța $R = R_0 + h$ se calculează cu formula (72). Facem raportul $g/g_0$ și scoatem pe $g$. Avem

$$g = \frac{R_0^2}{R^2} g_0.$$

Însă $a_c = g$ și deci vom scrie

$$\frac{4\pi^2}{T^2} R = \frac{R_0^2}{R^2} g_0$$

de unde

$$R^3 = \frac{gT^2}{4\pi^2} R_0^2.$$

Luînd valori rotunjite pentru $R_0$, $T$ și $g$ și anume: $R_0 \approx 6 \cdot 10^6$ m, $T \approx 9 \cdot 10^4$ s și $g \approx 10$ m/s$^2$ se obține, $R^3 \approx 7 \cdot 10^{22}$ m$^3$, de unde $R \approx 4 \cdot 10^7$ m, adică $R \approx 40\,000$ km. La această înălțime frecarea cu aerul atmosferic este, practic, nulă și de aceea satelitul își va menține mișcarea sa cu viteză tangențială constantă. Astfel de sateliți geostaționari au fost lansați atît în U.R.S.S., cît și în S.U.A. Printr-un astfel de satelit s-a reușit în 1976 să se aprindă flacăra olimpică la Olimpiada de la Montreal din Canada.

În expresia forței gravitației universale și a accelerației gravitaționale intervine un factor de proporționalitate $k$, denumit *constanta gravitației universale*. Valoarea acestei constante este

$$k = 6{,}673 \cdot 10^{-11}\ \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}.$$

Valoarea lui $k$ a fost determinată pentru prima dată de către Cavendish, în anul 1798. Ulterior au fost aduse importante perfecționări metodei folosite de Cavendish, de către Poynting și Boys, în secolul al XIX-lea. Valoarea cea mai exactă a lui $k$ este aceea dată mai sus și a fost obținută de către P.R. Heyl și P. Chizanowski de la Biroul Național de Standarde al S.U.A., în anul 1942.

Henry *Cavendish*, fizician și chimist englez, membru al Societății Regale din Londra, s-a născut în anul 1731, adică la patru ani după moartea lui Newton și a trăit pînă în anul 1810.

Cavendish a contribuit prin activitatea sa de cercetare științifică la fundamentarea riguros științifică atît a fizicii, cît și a chimiei. În fizică a introdus noțiunea de capacitate a unui conduc-

[1] În formularea lui Newton se spune că toate corpurile cad fiindcă sînt atrase de Pămînt și că greutatea înseamnă forța cu care Pămîntul atrage corpul.

tor și a făcut celebra experiență în care a determinat valoarea constantei gravitației universale. Ideea acestei determinări aparține de fapt, reverendului John Mitchele, care construise și aparatul, însă n-a apucat să-l folosească, deoarece a murit. Cavendish a preluat aparatul și l-a perfecționat într-o asemenea măsură încît se poate spune că a construit unul nou și cu ajutorul acestuia a determinat $k$. Măsurătorile sale au fost descrise, în anul 1798, în Philosophical Transaction of the Royal Society.

Condițiile de precizie erau deosebite, iar grija de a înlătura orice efecte perturbatoare oricît de mici ar fi ele, a fost extrem de mare, Cavendish dovedindu-se un experimentator abil și de o rigurozitate remarcabilă.

Importanța științifică a experiențelor lui Cavendish constă, în primul rînd, în faptul că au confirmat legea gravitației universale prin evaluarea constantei gravitației universale $k$ și, în al doilea rînd, în faptul că ele au condus la construirea unor aparate numite *gravimetre*, destinate prospecțiunilor geologice.

Tot experimental, Cavendish a determinat masa Pămîntului și, cunoscînd volumul, a calculat densitatea ($M = 5{,}97 \cdot 10^{24}$ kg și $\rho \approx 5\,560$ kg/m$^3$).

După experiențele lui Cavendish s-a condus Coulomb atunci cînd a descoperit legea care-i poartă numele.

Experiențele lui Cavendish au permis să se tragă concluzii cu privire la nucleul Pămîntului.

Pe baza legii gravitației universale, însuși autorul ei a elaborat o teorie a mareelor. Mareele se datoresc faptului că Luna, în special, dar și Soarele, exercită forțe de atracție asupra oceanelor.

Pentru a înțelege mai ușor formarea mareelor vom explica influența Lunii asupra Pămîntului. Este clar că asupra tuturor corpurilor de pe Pămînt nu acționează numai gravitația terestră, ci și gravitația Lunii, Soarelui și a tuturor celorlalte corpuri cerești înconjurătoare. Însă influența cea mai mare o are Luna. Față de Lună, Pămîntul în întregime are accelerația

$$a_{PL} = k \frac{M_L}{r_{PL}^2}, \qquad (74)$$

unde $M_L$ este masa Lunii, $r_{PL}$ distanța dintre centrele Pămîntului și Lunii.



Să considerăm un corp de masă $m$ aflat pe suprafața Pămîntului și să scriem expresia accelerației $\vec{a}_{PL}$ a corpului datorită Lunii

$$a_{CL} = k \frac{M_L}{r_{CL}^2}.$$

Accelerația corpului față de Pămînt o notăm cu $\Delta a$ (fig. 50). Deoarece $a_{PL}$ este constantă, iar $a_{CL}$ variabilă în funcție de poziția corpului pe suprafața Pămîntului, rezultă că $\Delta a$ va depinde de poziția corpului pe suprafață și deci este variabilă. Acum să calculăm accelerația datorită Lunii în punctele diametral opuse ale Pămîntului, mai apropiat și mai depărtat de Lună, precum și într-un punct intermediar. Din figura 51 se poate deduce orientarea forțelor care acționează în punctele extreme. Cu săgeți negre am reprezentat accelerația imprimată Pămîntului de către Lună, iar cu săgeți albe accelerația imprimată de către Lună unui corp oarecare aflat în punctele considerate, $A$ și $B$. Accele-

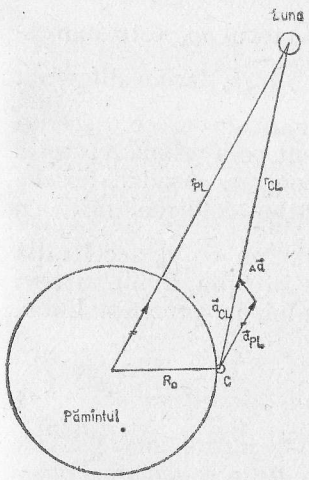



Fig. 50. Pentru explicarea fenomenului de maree.

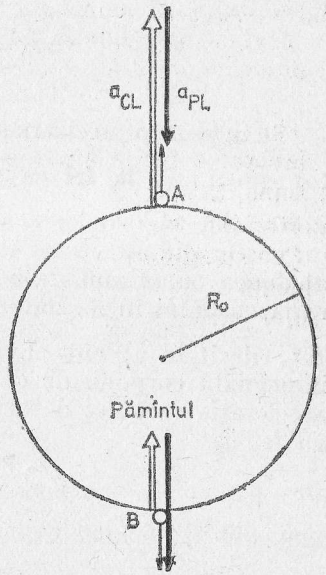



Fig. 51. Pentru explicarea fenomenului de maree.

rația rezultantă în $A$, ca urmare a acțiunii Lunii asupra Pămîntului și asupra corpului de pe suprafața Pămîntului, va fi

$$\Delta\vec{a}_A = \vec{a}_{CL} - \vec{a}_{PL}$$

sau

$$\Delta a_A = k\frac{M_L}{r_{CL}^2} - k\frac{M_L}{r_{PL}^2}$$

unde $r_{CL}$ este distanța dintre centrul corpului și al Lunii și $r_{PL}$ distanța dintre centrul Pămîntului și centrul Lunii. Însă,

$$r_{CL} = r_{PL} - R_0$$

și deci

$$\Delta a_A = \frac{kM_L r_{PL}^2 - kM_L(r_{PL} - R_0)^2}{r_{PL}^2(r_{PL} - R_0)^2} = k\frac{M_L R_0(2r_{PL} - R_0)}{r_{PL}^2(r_{PL} - R_0)^2}.$$

Cum însă $r_{PL} \gg R_0$, pe $R_0$ (din paranteze) îl vom neglija și vom obține

$$\Delta a_A = k\frac{2M_L R_0}{r_{PL}^3}. \qquad (75)$$

Se impune o precizare și anume: vectorul $\vec{a}_{CL}$ este îndreptat spre Lună, la fel ca și $\vec{a}_{PL}$. Cînd, însă, facem diferența vectorială, $\vec{a}_{PL}$ se desenează ca în figură, deoarece a scădea un vector din alt vector este echivalent cu a aduna vectorul al doilea cu primul, însă cu semn contrar. Așadar, accelerația corpului în $A$, datorită Pămîntului, este mai mică cu $\Delta a_A$ decît în absența Lunii. Dacă notăm cu $\vec{g}_0$ accelerația imprimată corpului de către Pămînt în lipsa Lunii, atunci accelerația corpului datorită Pămîntului, în prezența Lunii, va fi

$$\vec{g}_0' = \vec{g}_0 - \Delta\vec{a}_A$$

sau

$$g_0' = k\frac{M}{R_0^2} - k\frac{2M_L R_0}{r_{PL}^3}.$$



În partea diametral opusă lui $A$, adică în punctul $B$, vom avea (fig. 51)

$$\Delta\vec{a}_B = \vec{a}_{PL} - \vec{a}_{CL}$$

sau

$$\Delta a_B = k\frac{M_L}{(r_{PL} + R_0)^2} - k\frac{M_L}{r_{PL}^2} = \frac{kM_L[r_{PL}^2 - (r_{PL} + R_0)^2]}{r_{PL}^2(r_{PL} + R_0)^2}.$$

Efectuînd calculele, se obține

$$\Delta a_B = -\frac{2kM_L R_0}{r_{PL}^3}.$$

Se observă că, în valoare absolută, accelerația rezultantă datorită acțiunii Lunii asupra Pămîntului și asupra corpului are aceeași valoare în cele două puncte diametral opuse, adică

$$|\Delta a_A| = |\Delta a_B| = |\Delta a|.$$

Prin urmare, din accelerația gravitațională imprimată unui corp aflat în $A$ sau $B$, în lipsa Lunii, se scade $\Delta\vec{a}$ și deci accelerația corpului în prezența Lunii este

$$\vec{g}_0' = \vec{g}_0 - \Delta\vec{a}$$

și

$$\vec{G} = m\vec{g}_0'.$$

Așadar, datorită Lunii corpul are greutate mai mică în $A$ și respectiv $B$, deci este mai ușor.

În figura 52 se arată schema care stă la baza calculului accelerației cînd corpul se află într-un punct oarecare, diferit de $A$ sau $B$, așa fel încît $r_{PL} = r_{CL}$. Punctele $B$ și $C$ găsindu-se la aceeași depărtare față de Lună, rezultă

$$\vec{a}_{PL} = \vec{a}_{CL}.$$

Diferența vectorială dintre cei doi vectori $\vec{a}_{PL}$ și $\vec{a}_{CL}$ este $\Delta\vec{a}_C$. Triunghiurile $ABC$ și $CDE$ sînt isoscele și din geometria figurii rezultă că

$$\triangle ABC \sim \triangle CDE$$

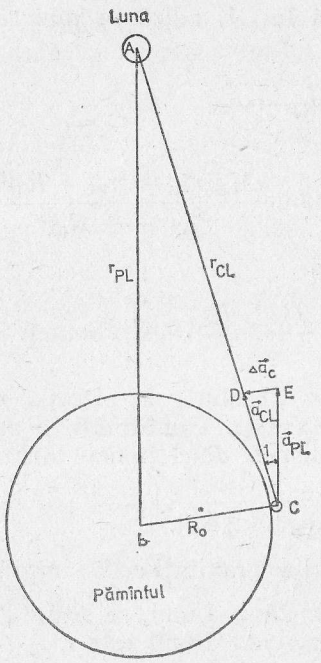



Fig. 52. Pentru explicarea fenomenului de maree.

deoarece $\measuredangle C_1 = \measuredangle A$ și au cîte două laturi paralele. Deci vom scrie

$$\frac{\Delta a_C}{R_0} = \frac{a_{PL}}{r_{PL}}$$

de unde

$$\Delta a_C = \frac{R_0}{r_{PL}} a_{PL}.$$

Ținînd seama de (74) rezultă

$$\Delta a_C = k \frac{M_L R_0}{r_{PL}^3}. \qquad (76)$$

Să facem acum raportul expresiilor (75) și (76); vom avea

$$\frac{\Delta a_A}{\Delta a_C} = 2$$



de unde

$$\Delta a_C = \frac{1}{2} \Delta a_A.$$

Se observă că accelerația rezultantă a corpului în punctul $C$ este numeric mai mică decît în punctele $A$ sau $B$; aceasta înseamnă că greutatea unui corp în $C$ este mai mare decît greutatea aceluiași corp în $A$ sau $B$. Într-adevăr, vectorul $\Delta\vec{a}_C$ este orientat către centrul Pămîntului, deci în jos, adică are direcția verticalei locului. Accelerația $\Delta a_C$ se adaugă la accelerația gravitațională a Pămîntului exercitată asupra corpului și, ca urmare, și greutatea corpului este mai mare în $C$ decît în $A$ sau $B$.

Cele expuse mai sus sînt valabile nu numai pentru Lună, ci și pentru Soare sau pentru o planetă oarecare sau o stea. Însă, în aceste cazuri, calculul arată că accelerația imprimată corpului este neglijabil de mică, aproape nulă. Și tot calculul arată că în cazul Soarelui[1] accelerația imprimată corpului este de 2,17 ori mai mică decît accelerația imprimată de Lună. Se poate arăta prin calcul că accelerația corpului datorită Lunii este a zecea milioana parte din $g$. Calculul se face folosind formula (76) în care se introduc valorile mărimilor ce intervin: $k \approx 7 \cdot 10^{-11}$ N $\cdot$ m$^2$ $\cdot$ kg$^{-2}$; $R_0 = 6{,}4 \cdot 10^6$ m, $r = 3{,}8 \cdot 10^8$ m, $M_L \approx 7{,}4 \cdot 10^{22}$ kg. Se obține valoarea $2 \cdot 10^{-6}$ m/s$^2$. Comparînd-o cu $g$ ($\approx 10$ m/s$^2$), găsim că este mai mică decît aceasta de aproximativ zece milioane de ori.

Așadar, influența Lunii asupra accelerației gravitației terestre este infimă și s-ar părea că nu merită să se ocupe nimeni de așa ceva. Totuși, să nu uităm că aceasta determină producerea mareelor, care în 24 de ore eliberează o energie cinetică de $\sim 10^{17}$ J, deplasînd în acest timp cantități uriașe de apă. Această energie este egală cu energia tuturor rîurilor de pe întregul glob terestru. La antipozi, adică în punctele $A$ și $B$, greutatea fiind mai mică în prezența Lunii decît în absența ei[2], înseamnă că un corp aflat în aceste puncte ar trebui să se depărteze de centrul Pămîn-

[1] Soarele se află la distanță de 149 500 000 km față de Pămînt, în timp ce Luna se află la numai 380 000 km. Masa Lunii este de zeci de milioane de ori mai mică decît masa Soarelui.

[2] Cititorul înțelege, desigur, că este vorba numai de o ipoteză, deoarece Luna nu poate fi înlăturată nici un moment.

tului[1]. Ținînd seama de valoarea razei Pămîntului, această deplasare ar fi de ordinul centimetrilor. Scoarța terestră fiind solidă nu se observă această deplasare. Masa de apă a oceanelor, însă, se ridică atunci cînd Luna se află la zenit sau la nadir. De exemplu, dacă Luna ar sta suspendată deasupra unui ocean, apa s-ar ridica la antipozi cu 54 cm, în timp ce într-un punct de pe linia de mijloc, pe suprafața Pămîntului, apa oceanului s-ar ridica cu numai 27 cm. Locurile unde nivelul apei oceanelor se ridică și coboară se deplasează mereu datorită rotației Pămîntului. Acest fenomen este cunoscut sub denumirea de *maree*. Cînd apa se ridică, ea se deplasează spre țărm; fenomenul durează 6 ore și se numește *flux*. Cînd apa coboară, ea se deplasează depărtîndu-se de țărm; fenomenul se numește *reflux* și durează tot 6 ore. Așadar, în fiecare zi lunară au loc două fluxuri și două refluxuri. Fenomenul de maree este mult influențat de conturul țărmurilor, de forma fundului oceanului, de vîscozitatea apei. Există mări unde fenomenul de maree nu se produce. Așa este Marea Caspică, unde întreaga suprafață se află în același timp în condiții identice. Fenomenul de maree nu se produce la mările interioare legate cu oceanele prin strîmtori lungi și înguste ca Marea Baltică și Marea Neagră.

În golfurile înguste, apa adusă de ocean în timpul fluxului se ridică la un nivel de ordinul metrilor, dar și coboară mult nivelul în timpul refluxului. În astfel de golfuri, mareele au o energie cinetică enorm de mare. În timpul fluxului limita dintre uscat și apa oceanelor se modifică cu mai mulți kilometri, acolo unde țărmul este plat. Așa este cazul țărmului Franței.

Fenomenul de maree determină o scădere a vitezei de rotație a Pămîntului din cauză că pentru a învinge frecările cauzate de maree este necesară o cheltuială de energie. Aceasta atrage, însă, după sine o creștere a duratei zilei.

Așa cum arată cercetările, cîndva Luna a fost o masă globulară lichidă și din cauza mareelor puternice de pe ea mișcarea de rotație s-a efectuat cu viteze din ce în ce mai mici, încît rotația ei față de Pămînt a încetat și totodată și mareele. Ca urmare, după solidificare, Luna a rămas cu aceeași față înspre Pămînt. Așadar, fenomenul de maree permite să se explice de ce Luna ne arată mereu aceeași față.

[1] Ca urmare a acțiunii forței centrifuge terestre.



În concluzie, fluxul are loc în regiunile în care Luna se află la zenit și punctul opus, sau la nadir și punctul opus; refluxul, însă, se produce atunci cînd Luna se vede la orizont, răsărind sau apunînd.

Soarele produce un efect similar, numai că acest efect este aproximativ de două ori și jumătate mai slab decît efectul produs de Lună. Cele două efecte, datorit Lunii și respectiv Soarelui, se însumează atunci cînd este lună plină sau lună nouă. Efectele se scad în timpul cînd Luna se află în primul sfert al ei și în al treilea sfert. Evident că în primele cazuri atît fluxul, cît și refluxul sînt mari ca intensitate și deci cantitatea de apă deplasată este mare, iar în celelalte două cazuri fluxul și refluxul sînt mai mici ca intensitate și, ca atare, și cantitatea de apă deplasată va fi mai mică decît în cazurile precedente.

Sub acțiunea forțelor care iau naștere în timpul fluxului și refluxului, partea solidă a Pămîntului suferă numai deformații elastice și acestea extrem de mici. Aceasta constituie o dovadă incontestabilă că Pămîntul în cea mai mare parte a lui este solid și dacă există un nucleu lichid, acesta este de dimensiuni reduse. În caz contrar, forțele cu care acționează fluxul și refluxul ar produce necontenit o rupere a scoarței terestre.

Să arătăm acum în ce fel se modifică accelerația gravitațională pe măsură ce ne apropiem de centrul Pămîntului. În acest scop ne vom imagina Pămîntul alcătuit dintr-o infinitate de particule. Fiecare particulă exercită o forță asupra oricărui corp. Rezultanta tuturor acestor forțe ce acționează asupra unui corp reprezintă greutatea acelui corp. Cu toate că aceste forțe au cele mai diferite direcții, așa cum am mai arătat, direcția rezultantei lor are direcția către centrul Pămîntului. Aceasta este valabil pentru un corp care se află pe suprafața Pămîntului sau într-un punct deasupra solului la o înălțime $h$ față de nivelul mării. Dacă, însă, corpul s-ar afla în interiorul Pămîntului, undeva la o anumită adîncime, evident că situația ar fi diferită de prima, deoarece el ar fi supus forțelor de atracție atît din partea particulelor aflate în straturile de deasupra sa, cît și a particulelor aflate în straturile de dedesubtul său. Așa fiind, se pune în mod firesc întrebarea: cum va fi greutatea corpului într-o astfel de poziție față de greutatea lui la suprafața solului, mai mare, mai mică sau egală ca valoare? Pentru a răspunde la întrebare vom considera un punct $P$ în inte-

riorul Pământului la o anumită adîncime $h$ și forțele gravitaționale care acționează în punctul respectiv din partea straturilor care se află deasupra sa. În interiorul fiecărui strat vom presupune că densitatea Pământului este constantă. Stratul de deasupra îl vom împărți în straturi subțiri și pe unul din aceste straturi subțiri vom decupa o porțiune de forma unui pătrat cu latura $l_1$. Acestui pătrat îi corespunde în partea opusă un alt pătrat cu latura $l_2$ (fig. 53).

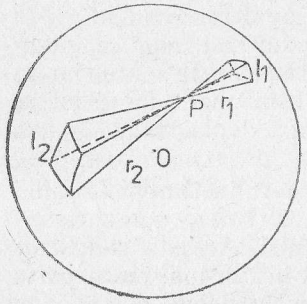



Fig. 53. Pentru explicarea variației lui $g$ cu adîncimea.

În punctul $P$ acționează forțe de atracție din partea pătratelor considerate. Aceste forțe însă au sensuri contrare și ele sînt direct proporționale cu rapoartele: $m_1/r_1^2$ și $m_2/r_2^2$. Aici $m_1$ și $m_2$ reprezintă masele pătratelor considerate. Dar aceste mase sînt, evident, direct proporționale cu ariile pătratelor respective și, prin urmare,

$$F_1 \sim \frac{l_1^2}{r_1^2} \text{ și } F_2 \sim \frac{l_2^2}{r_2^2}.$$

Să privim cu atenție figura 53. Se vede că $\alpha_1 = \alpha_2$ și că pentru $l_1$ și $l_2$ mici, încît să se confunde cu un segment de dreaptă, geometria figurii dă

$$\frac{l_1}{r_1} = \frac{l_2}{r_2}$$

și

$$\frac{l_1^2}{r_1^2} = \frac{l_2^2}{r_2^2}$$

și deci

$$F_1 = F_2.$$



Prin urmare, cele două pătrate considerate acționează în punctul $P$ cu forțe de atracție egale și de sensuri opuse. Așa fiind, efectul lor asupra punctului $P$ este nul. Forțele își fac echilibru. Am considerat, însă, numai două pătrate opuse pe o aceeași suprafață sferică. Dar pe această suprafață sferică sînt o multitudine de perechi de pătrate și bineînțeles că rezultanta tuturor forțelor exercitate de pătratele de pe o aceeași suprafață sferică este nulă; toate forțele se echilibrează două cîte două. Dar ce înseamnă aceasta? Înseamnă că un strat sferic omogen exercită o acțiune nulă asupra oricărui punct din interiorul ei. Acest rezultat este valabil și pentru toate celelalte suprafețe sferice situate în exteriorul lui $P$. Prin urmare, forța rezultantă de atracție exercitată de întregul strat aflat deasupra punctului $P$ este nulă, ca și cum acest strat nu ar exista. Așa fiind, asupra unui punct aflat la adîncimea $h$ acționează *numai* straturile interioare ale Pămîntului.

La adîncimea $h$, accelerația gravitației $g$, conform cu (71), este

$$g = k\frac{M}{(R_0 - h)^2},$$

dar

$$M = \rho V = \frac{4}{3}\pi(R_0 - h)^3\rho$$

și deci

$$g = \frac{4}{3}k\pi(R_0 - h). \qquad (77)$$

Din această relație reiese că $g$ scade cu creșterea adîncimii. Însă experiența arată, iar formula (71) o confirmă, că în apropiere de suprafața solului $g$ crește cu adîncimea $h$. Care să fie cauza? s-au întrebat oamenii de știință. Așa cum demonstrează cercetările, densitatea straturilor Pămîntului crește cu adîncimea. *În stabilirea formulei (77) nu s-a ținut seama de această variație.* Or, în apropierea suprafeței Pămîntului *variația lui* $\rho$ *cu adîncimea* este importantă, din care cauză $g$ *crește* cu adîncimea, așa cum rezultă din (71) (deci $g_{poli} > g_{ec}$). Prin urmare, formula (71) rămîne valabilă și nu (77).

Variația lui $g$ cu adîncimea poate fi studiată pe o distanță de pînă la 5 km față de nivelul mării. Pe această adîncime, densitatea rocilor este de 2 750 km/m$^3$, în timp ce densitatea medie a Pămîntului calculată din raportul dintre masa și volumul său este de 5 560 km/m$^3$. Așadar, densitatea medie a Pămîntului este de aproape două ori mai mare decît densitatea rocilor din straturile superficiale.

În concluzie, densitatea straturilor Pămîntului în apropierea suprafeței crește cu adîncimea și aceasta atrage după sine creșterea lui $g$ cu adîncimea.

Cunoașterea valorilor lui $g$ prezintă o mare importanță teoretică și practică. În scopul măsurării lui $g$ s-au construit balanțe speciale, denumite *balanțe geologice*. Cu ajutorul lor se descoperă zăcăminte minerale în subsol prin măsurători simple efectuate la suprafața solului. Procedeul constă în măsurarea greutății unei mase standard în diverse locuri. Aceste *balanțe geologice* sînt de fapt niște dinamometre extraordinar de sensibile. Sensibilitatea lor este de ordinul $10^{-8}$ N. Așadar, o modificare a greutății masei standard, într-un anumit loc, cu numai a suta milioana parte dintr-un newton înseamnă, în același timp, o modificare a lui $g$ cu același ordin de mărime.

Accelerația gravitației prezintă două variații foarte bine cunoscute de către cercetători: $g$, conform formulei (71), este mai mare la poli decît la ecuator, adică variază cu latitudinea geografică. În plus, forța centrifugă ce acționează asupra unui corp, ca urmare a mișcării de rotație a Pămîntului, are valoare zero la poli și maximă la ecuator. Această forță se scade din greutatea corpului. Astfel, greutatea unui corp la poli va fi mai mare decît la ecuator. Aceasta este o altă cauză care face ca $g$ să fie mai mic la ecuator. Însă, $g$ variază și cu înălțimea după relația (72) și anume, scade cu creșterea altitudinii. Cele arătate aici conduc la concluzia că la aceeași latitudine geografică și aceeași altitudine $g$ trebuie să aibă aceeași valoare, care este considerată *valoare normală*. În realitate, însă, se constată unele abateri de la această valoare normală. Aceste anomalii se datoresc faptului că în apropierea punctului în care se face măsurătoarea lui $g$ există o distribuție neomogenă a masei.

Am arătat mai înainte că forța cu care Pămîntul acționează asupra unui corp este rezultanta forțelor exercitate asupra corpului de către diferitele particule ce alcătuiesc



Pămîntul. Particulele aflate mai aproape de corp vor exercita o forță mai mare decît particulele mai depărtate, fiindcă, așa cum am spus, această forță este invers proporțională cu pătratul distanței de la particulă la corp. De aici rezultă că într-un punct, în apropierea unor mari concentrări de mase, $g$ va fi mai mare decît valoarea normală și invers, într-un punct în apropierea unui loc cu mici concentrări de mase, $g$ va fi mai mic decît valoarea normală. De exemplu, să presupunem că s-ar măsura $g$ pe vîrful Omul și s-ar găsi valoarea $g_0$. Dacă s-ar face apoi măsurarea lui $g$ într-un punct deasupra Mării Negre la o altitudine egală cu înălțimea vîrfului Omul s-ar găsi $g_M$. Desigur că, comparînd valorile s-ar vedea că $g_0 > g_M$. Diferența de valori ar fi de ordinul $10^{-3}$ m/s$^2$. Măsurătorile efectuate asupra lui $g$ pe vîrful Etna din Sicilia au arătat că $g$ este mai mare decît valoarea normală cu $3 \cdot 10^{-3}$ m/s$^2$.

Putem conchide că acolo unde valorile lui $g$, obținute prin măsurători, sînt mai mari decît valoarea normală la aceeași altitudine există concentrări de mase.

Accelerația gravitațională este, însă, o mărime vectorială, dirijată. De aceea se poate modifica nu numai modulul ei, ci și direcția. Pentru a se studia această anomalie, se stabilește așa-numita *verticală normală*. Această verticală este cunoscută de geologi de pe o hartă specială pe care s-a construit așa-numita *figură ideală* a Pămîntului, folosindu-se valorile lui $g$. Cercetătorii au calculat în ce punct verticala acestei figuri ideale înțeapă bolta cerească într-o anumită oră a zilei și a anului și aceasta pentru fiecare punct geografic. De aceea, verticala normală se determină după stele. Dar la ce servește cunoașterea *verticalei normale*? Să presupunem un fir de plumb suspendat într-un anumit loc. El va indica verticala locului care ar putea sau nu să coincidă cu *verticala normală*. Abaterile firului de plumb de la *verticala normală* dă unele indicii prețioase, așa cum vom vedea mai departe, cu privire la locul respectiv. De pildă, la Florența s-a constatat un fenomen aparent bizar. Firul de plumb era deviat în sensul depărtării lui de Munții Apenini, ca și cum acesta ar fi fost respins. Acestui fenomen i s-a dat o singură explicație ca fiind posibilă și anume că în Munții Apenini există un gol imens. Cercetările efectuate ulterior în aceeași zonă au confirmat această explicație.

Suspendînd un fir cu plumb în apropierea unui munte, acesta va fi orientat de către masa Pămîntului înspre centru,

iar muntele îl va devia de la această direcție. Unghiul de deviație este de numai cîteva secunde de unghi.

Măsurători ale accelerației gravitaționale efectuate deasupra oceanelor și a continentelor au arătat că, în medie, $g$ are aceeași valoare, cu toate că se aștepta ca pe continente valorile lui să fie mai mari. Acestei constatări i s-a dat o singură explicație, ca fiind posibilă, explicație confirmată de cercetări geologice și anume: continentele „stau" pe roci de granit ușor, iar oceanele pe roci de bazalt greu. Faptul că se produce o compensare între valorile lui $g$ deasupra oceanelor și valorile lui deasupra continentelor se datorește structurii scoarței terestre și anume, straturile superioare „stau" pe o masă ușor deformabilă (ca argila umedă). La o aceeași adîncime, presiunea trebuie să fie identică, așa cum este identică presiunea la o aceeași adîncime într-o apă pe suprafața căreia se găsesc bucăți de lemn de mase diferite. Ținînd seama de toate acestea, se poate spune că o coloană de substanță cu lungimea de 100 km, măsurată de la suprafața solului și cu aria secțiunii transversale de $1\,m^2$ trebuie să fie atrasă de Pămînt cu aceeași forță, fie că se găsește sub continente, fie sub oceane. Datorită acestui fapt, $g$ este același în lungul aceleiași linii de altitudine deasupra continentelor și a oceanelor. Astfel, acolo unde măsurătorile pentru $g$ vor indica o valoare mai mare decît cea normală, se vor găsi zăcăminte metalifere, iar acolo unde valorile lui vor fi găsite mai mici decît valoarea normală vor exista zăcăminte de sare sau de petrol. Interesant este că acolo unde există sare este și petrol, sarea mai la suprafață, iar petrolul mai la adîncime.

Ne dăm seama cu ușurință de importanța măsurării cît mai precise a lui $g$. În prezent precizia atinsă este de $10^{-7}$ $m/s^2$. Pentru aceasta, însă, s-au construit aparate speciale, mult mai sensibile și deci și mai exacte decît instrumentul amintit mai sus. Așa este *balanța de torsiune* cu fir de cuarț.

În a doua jumătate a secolului trecut, fizicianul scoțian J.C. Maxwell a dat o teorie, revoluționară la vremea sa, și anume teoria cîmpului electromagnetic, în care se arată că atunci cînd o particulă încărcată electric oscilează, emite unde electromagnetice. De asemenea, se spune, în această teorie, că lumina este o *undă electromagnetică*. Ulterior, Louis de Broglie a arătat că această undă se asociază unei particule numită *foton*, particulă care are numai masă de mișcare, masa de repaus fiind nulă. Louis de Broglie a generalizat acest fapt arătînd că orice particulă de masă $m$, care se mișcă cu viteza $v$, are asociată o undă cu lungimea

$$\lambda = \frac{h}{mv}.$$

În mod similar s-a presupus și în teoria gravitației că trebuie să existe o particulă cu masa $m$, care — oscilînd — ar emite unde numite de cercetători *unde gravitaționale*. Aceste unde trebuie să se asocieze particulei ce oscilează, particulă ce a primit numele de *graviton*.

Undele gravitaționale au rezultat din teorie. De aceasta s-au ocupat mulți oameni de știință, unul dintre ei fiind A. Einstein, care în 1918 le-a descoperit ca soluții ale ecuației fundamentale a teoriei relativității generalizate. Dar aceste unde sînt purtătoare de energie și această energie este infimă; frecvența lor este însă foarte mare. Aceasta înseamnă că masa particulelor asociate este enorm de mică. În concluzie, analogia dintre cîmpul gravitațional și cîmpul electromagnetic a condus la ipoteza existenței structurii discontinue a cîmpului gravitațional, a existenței undelor gravitaționale și a particulelor cărora le sînt asociate, *gravitonii*. Aceste particule, așa cum arată fizicienii teoreticieni, între care P.A.M. Dirac, au o probabilitate de interacție uniformă. De asemenea, gravitonii nu ar avea sarcină electrică și nici masă care să poată fi detectată. Gravitonii au spinul egal cu de două ori spinul fotonului. Pe baza acestor proprietăți teoretice ale gravitonului, oamenii de știință au căutat să identifice gravitonul cu o pereche de neutrini cu spin dublu.

Nu demult a fost pusă în evidență, pe cale experimentală, existența undelor gravitaționale emise de stelele supernove și stelele neutronice, precum și de către pulsari (stele pulsatoare). Demn de reținut este faptul că cea mai mare parte a descoperirilor în domeniul gravitației au fost făcute în Univers. Aceasta a condus la o nouă ramură științifică, denumită *astronomie gravitațională*.

O realizare însemnată a acestei noi ramuri a științei o constituie *„lentila" gravitațională*, care reprezintă o confirmare a teoriei generale a relativității. Aceasta arată, între altele, că atunci cînd razele de lumină trec prin apropierea unui corp cosmic ele sînt deviate de la direcția lor rectilinie, încît traiectoria lor este curbilinie. Cu cît masa corpului este mai mare, cu atît și forța gravitațională exercitată de

acest corp este mai mare și, de aceea, cu atît este mai mare și curbura traiectoriei, adică raza traiectoriei este mai mică, așa cum vom vedea la momentul oportun. Curbarea razelor de lumină a fost descoperită în anii 1919 și 1922, constituind o strălucită confirmare a teoriei generale a relativității. Această teorie mai arată că atunci cînd razele de lumină ajung pe un corp cosmic își măresc viteza și, ca atare, crește și energia lor. Însă, așa cum se știe, atunci cînd energia crește, frecvența radiației respective crește și ea. Acest fenomen este cunoscut sub denumirea de *deplasarea gravitațională a frecvenței radiațiilor.*

Pentru a măsura efectul produs de lumină cînd aceasta ajunge pe Pămînt, s-a folosit efectul Mössbauer. Aceasta reprezintă înregistrarea celui mai slab efect fizic cunoscut în orice domeniu al științei sau al tehnicii; el este de ordinul $10^{-14}$.

Dar astronomia gravitațională marchează și descoperirea cvasistelelor denumite *quasari.* Quasarii degajă o energie atît de mare încît pînă în prezent nu a putut fi explicată. Un exemplu edificator: un quasar din constelația Fecioarei este de o mie de miliarde de ori mai luminos decît Soarele, cu toate că de pe Pămînt se vede ca o stea extrem de mică. Aceasta se datorește distanței enorm de mari dintre quasarul respectiv și Pămînt. Acest quasar emite o energie de aproximativ $3 \cdot 10^{41}$ kWh.

Se presupune că sursa de energie a quasarilor ar constitui-o așa-numitul *„colaps gravitațional"* (prăbușire gravitațională). Colapsul gravitațional se datorește absenței rotației la aceste corpuri și deci lipsei forței centrifuge. Din această cauză are loc o atracție intensă înspre centrul quasarului, adică o creștere extrem de mare a cîmpului gravitațional. Cu alte cuvinte, quasarul este un corp cosmic puternic comprimat. Important este că această comprimare este atît de mare încît sînt comprimați înșiși atomii. Astfel, ca urmare a procesului de comprimare, electronii acestora pătrund în nucleu și împreună cu protonii produc așa-numita *„materie neutronică"*, a cărei densitate este enorm de mare. Un corp format din „materie neutronică" reprezintă o *stea neutronică.* Primul stadiu de viață al unei stele neutronice este acela de „pitică albă". Densitatea acestor stele este de ordinul milioanelor de milioane de tone pe metru cub, adică de o mie de miliarde de ori mai mare decît densitatea apei ($\rho_{apă} = 1\,000$ kg/m³).



Se presupune, de asemenea, că un quasar s-ar prezenta în ultima fază a vieții sale ca o supernovă, cînd — după explozie — urmează colapsul gravitațional. Energia degajată în timpul exploziei este însă de cîteva miliarde de ori mai mică decît energia degajată în timpul colapsului, adică în stare de quasar. Se pot spune încă multe lucruri interesante și importante, însă spațiul pe care îl avem la dispoziție ne obligă să ne limităm numai la cele de mai sus.

O problemă care, de asemenea, îi preocupă mult pe oamenii de știință este aceea a *antigravitației.* În acest sens, cercetătorii sînt frămîntați de următoarea întrebare: antiparticulele au cumva mase gravitaționale negative? Aceste mase, dacă ar exista, ar crea, evident un cîmp antigravitațional. S-au imaginat experiențe foarte sensibile care să confirme sau să infirme existența maselor gravitaționale negative și deci a antigravitației. Am spus că s-au imaginat experiențe, deoarece concret încă nu s-a putut realiza nimic în acest sens.

Una dintre experiențe ar fi următoarea: să se trimită un fascicul de antiparticule, accelerate într-o instalație modernă, paralel cu suprafața solului. În cazul că fasciculul ar fi deviat de către forța gravitațională terestră în sus, aceasta ar fi o dovadă incontestabilă că antiparticulele au mase gravitaționale negative și deci s-ar evidenția existența antigravitației. În cazul că fasciculul de antiparticule ar fi deviat în jos, atunci aceasta ar fi o dovadă că antiparticulele au masă gravitațională la fel cu a tuturor corpurilor cunoscute pe Pămînt sau în Univers.

O altă problemă în atenția cercetătorilor o constituie aceea a *ecranelor gravitaționale.* Un asemenea ecran, dacă ar exista, ar părea că ar încălca legea conservării energiei și, în același timp, principiile termodinamicii, deoarece ar da posibilitatea, aparent, să se construiască un perpetuum mobile de prima speță, foarte ușor și simplu. De pildă, să ne imaginăm un ecran gravitațional sub forma unei plăci plasată sub o roată, dar în așa fel încît să ecraneze numai o jumătate de roată. Jumătatea cealaltă rămasă neecranată ar fi atrasă de Pămînt și deci ar cădea, punîndu-se astfel în mișcare întreaga roată. S-ar părea că o astfel de roată ar funcționa continuu, fără să i se comunice energie din exterior. În realitate, însă, ea ar primi permanent energia necesară de la cîmpul gravitațional (jumătatea de roată neecranată).

În plus, frecarea nu poate fi complet anulată. Aşadar, nu ar fi propriu-zis un perpetuum mobile şi, ca atare, nu ar încălca legile menţionate mai sus.

*Levitaţia* este o altă problemă care îi preocupă pe cercetători. Levitaţia este un fenomen ce constă în aceea că un corp greu ar putea sta suspendat în spaţiu un anumit interval de timp. Pentru aceasta ar trebui să se realizeze un echilibru între forţa gravitaţională şi alte tipuri de forţe, cum ar fi de exemplu forţa electromagnetică. În acest sens au fost întreprinse cercetări în diverse laboratoare din lume. De pildă, în laboratorul fizicianului sovietic Arkadiev, profesor la Universitatea din Moscova, s-a făcut o experienţă în care s-a reuşit ca deasupra unui magnet natural să stea în echilibru un inel de plumb. Aparent, corpul prezenta fenomenul de levitaţie. Spunem aparent, deoarece inelul de plumb a fost mai întîi răcit în heliu lichid devenind astfel supraconductor, iar cîmpul magnetic al magnetului natural crea în inel un curent circular, care, la rîndul său, producea un cîmp magnetic. Datorită interacţiunii celor două cîmpuri, inelul se menţinea în aer. Se părea că nu se producea consum de energie, dar o analiză mai atentă arăta că avea loc consum de energie şi anume energia datorită răcirii heliului pînă la lichefierea sa, precum şi a răcirii inelului.

Am prezentat aici unele probleme mai importante legate de fenomenul gravitaţiei. Rezolvarea lor este o chestiune de timp şi de această rezolvare depinde crearea unei teorii unitare a forţelor ce intervin în natură.

Isaac *Newton* (1642—1727), fizician, matematician şi astronom de geniu, s-a născut la cîteva luni după moartea lui Galileo Galilei. În acea vreme în domeniul ştiinţelor naturii s-a manifestat o înflorire cum nu a mai fost din timpul elenismului antic. Dintre ştiinţele naturii, fizica a cunoscut o înflorire, poate, fără precedent, în special în domeniul mecanicii şi opticii. O dezvoltare similară au cunoscut-o matematica şi astronomia, datorită faptului că aceste ramuri ale ştiinţei aveau legături mai strînse cu tehnica la nivelul epocii respective, cu agricultura, cu navigaţia. Aşa se explică de ce Newton s-a ocupat tocmai de domeniul mecanicii, opticii, matematicii şi astronomiei, unde a avut realizări remarcabile. În matematică cea mai însemnată realizare a lui Newton o constituie inventarea calculului infinitezimal, atribuită şi filozofului, logicianului şi matematicianului german Gottfried Wilhelm Leibniz (1646—1716), fondatoru. Academiei de Ştiinţe din Berlinl



**Isaac Newton**

În matematică, Newton mai apare cu formula dezvoltării binomului, cunoscută sub denumirea de *binomul lui Newton* şi altele.

În secolul în care s-a născut Newton a fost inventată luneta, de către Galilei (în anul 1609), cu ajutorul căreia inventatorul a făcut importante descoperiri în astronomie. Tot în acest secol se inventează microscopul ş.a. Cu toate acestea, Newton îşi aduce contribuţia sa importantă în optică. Dar cele mai însemnate realizări ale lui au fost în domeniul mecanicii şi astronomiei. Newton spunea uneori, după ce devenise celebru: „Dacă am putut vedea ceva mai departe decît alţii, aceasta se datoreşte faptului că m-am ridicat pe umeri de giganţi".

Într-adevăr, el studiase asiduu operele marilor matematicieni greci şi ale celor contemporani lui.

Newton a fost nu numai un neîntrecut fizician şi matematician, dar şi un filozof de mîna întîi.

S-a născut în anul 1642, în ziua de 25 decembrie[1] în familia unui mic fermier dintr-un mic sat numit Woolsthorpe, ce făcea parte din Comitatul Lincolnshire, la cîţiva kilometri sud de oraşelul Grantham. Copilul Isaac se născu prematur — la şapte luni — era debil şi nimeni nu spera să trăiască. A trăit, însă, aproape 85 de ani şi nu a fost bolnav decît la bătrîneţe, mai aproape de anul morţii sale.

În perioada în care a trăit Newton, Franţa cunoştea strălucirea domniei lui Ludovic al XIV-lea, Germania era fărîmiţată, românii

[1] 5 ianuarie 1643 pe stil nou.

trăiesc epoca domnitorului Dimitrie Cantemir (1673—1723) care a fost, în același timp, mare cărturar umanist, enciclopedist, poliglot (Cantemir a fost membru al Academiei de științe din Berlin). Tot în această vreme Rusia cunoștea perioada țarului și împăratului Petru cel Mare (1721—1725), care a trăit între anii 1682—1725.

Newton era o fire retrasă, timidă, mai ales din cauza debilității sale fizice. Din această cauză nici cu copiii de seama lui nu se juca, ci își petrecea vremea mai mult singur, construindu-și diverse jucării mecanice. Printre ele, o moară acționată de un șoricel, un zmeu cu lanternă cu care-i speria pe țărani.

Cînd Newton a împlinit 12 ani a fost dat la școala din orășelul Grantham. A stat în gazdă la un farmacist pe nume Clark, unde în timpul liber a învățat să facă experiențe de chimie, pe care le-a practicat apoi toată viața.

La această școală era printre ultimii elevi ai clasei la învățătură. Un eveniment care s-a produs într-o zi, l-a determinat să studieze, muncind fără preget. Dar despre ce eveniment este vorba? Un coleg al său, care era foarte bun la învățătură, dar și bătăuș, și încrezut, îl bate zdravăn. Newton se hotărî să-și ia revanșa și într-o altă zi îl învinge pe bătăuș. Văzînd succesul obținut hotărî să-l învingă și la învățătură și astfel devine cel mai bun elev al școlii, pe care o absolvă cu mare succes.

În vara anului 1661 se înscrie la Trinity College din Cambridge, pe atunci cea mai prestigioasă universitate a Angliei. Avea 19 ani. Aici studiază matematica și în anul 1665 își ia diploma de licențiat fără vreo mențiune specială.

Imediat după absolvire izbucnește o ciumă, care bîntuie prin Londra, secerînd zeci de oameni. Cum orașul Cambridge era aproape de Londra, colegiul de aici își suspendă activitatea, trimițînd pe toți studenții acasă. În acest fel, Newton ajunge din nou în satul său natal, unde stă pînă la redeschiderea universității.

În cele 18 luni cît a stat în satul său a conceput aproape toate descoperirile sale de mai tîrziu, pentru care omenirea își exprimă profunda sa gratitudine. Iată ce scria Newton despre această perioadă de 18 luni petrecută la Woolsthrope: „La începutul lui 1665 am găsit... regula de reducere a oricărui rang (putere) a unui binom la o serie[1]. În același an, în mai, am descoperit metoda tangentelor... și în noiembrie, metoda directă a fluxiunilor[2], iar în anul următor, în ianuarie, teoria culorilor și în mai următor

[1] Este vorba despre teorema binomului a lui Newton, care se învață la algebră, în licee.

[2] Adică ceea ce se numește azi calculul diferențial.



am făcut introducerea la metoda inversă a fluxiunilor[1] și în același an am început să mă gîndesc la gravitație, extinzînd-o la orbita Lunii... și... să o compar cu forța necesară pentru a ține Luna pe orbita ei cu ajutorul forței de gravitație de la suprafața Pămîntului.[2]

În anul 1668, pe cînd avea 26 ani, Newton ia ultimul titlu, Master of Arts (doctor în litere), fiind clasificat al 23-lea din totalul de 148 de candidați.

Celebrul Barow, profesor de matematică la Trinity College, l-a avut elev pe Newton și înțelegînd meritele excepționale ale elevului său, pentru care nutrea un sentiment de admirație, renunță la catedra sa cu condiția ca în loc să fie numit Newton. Barow trece la Catedra de teologie. Așa se face că la vîrsta de aproape 27 de ani, începînd din *octombrie 1669*, devine *profesor la Trinity College din Cambridge*.

Între anii 1669—1670 construiește telescopul reflector (telescop cu viziune laterală sau telescopul lui Newton, cum i se spune astăzi). Ideea construcției i-a fost sugerată de cartea de optică a lui James Gregory, care apăruse în anul 1663. Toate piesele aparatului și le-a confecționat singur.

Despre construcția telescopului, Newton îi scrie, în anul 1669, prietenului său Est. Dar, cu toate că Newton ținea secretă construcția aparatului, Societatea Regală din Londra a aflat despre noul instrument și a solicitat să-i fie prezentat. Newton, însă, a refuzat și abia în 1670 construiește un alt telescop, mai mare, pe care-l prezintă Societății Regale, în ziua de 11 februarie 1672. Aceasta a determinat alegerea sa ca membru al Societății Regale.

La scurt timp după alegerea sa, Newton prezintă o dare de seamă Societății Regale, în care își expune experiențele sale de optică și teoria dispersiei, stîrnind controverse cu mai mulți savanți contemporani, printre care Hooke și Huygens. Mai mult, Huygens, după ce și-a elaborat teoria ondulatorie a luminii la care a contribuit și Hooke, împreună cu Hooke a început să critice teoria corpusculară a lui Newton. [R. Hooke (1635—1703) a fost unul dintre fondatorii Societății Regale.]

Newton avea oroare de controverse și publicitate. El îi scrie lui Oldemberg, care era om de știință și secretar al Societății Regale din Londra, o scrisoare în care, cu amărăciune, îi povestește necazul ce-l are din cauza criticilor ce i se aduc. Și tot în aceeași scrisoare el mărturisește intenția de a renunța la filozofie, scriindu-i:

[1] Calculul integral.

[2] După *Biografia fizicii* de G. Gamov, Editura științifică și enciclopedică, București, 1971, p. 66.

„Văd că omul trebuie sau să se hotărască să nu producă nimic nou, sau să devină un sclav al descoperirii ca să o apere"[1].

Pe seama lui Newton este pusă o poveste cu un măr, care, căzînd dintr-un pom al grădinii sale prin care se plimba, i-a sugerat ideea cu privire la forța gravitațională. Povestea a fost răspîndită mai întîi de nepoata sa preferată, pe nume Ecaterina Barton, care i-a povestit întîmplarea lui Voltaire și acesta a transmis-o mai departe.

Am spus că este o poveste, deoarece gravitația a constituit obiectul preocupărilor și pentru alți cercetători înaintea lui Newton și deci simpla cădere a mărului nu putea să-i sugereze ideea existenței forței gravitaționale. Printre acești cercetători au fost: Leonardo da Vinci, Copernic, Kepler, Hooke, Halley. Marele merit al lui Newton este că a finalizat cercetările înaintașilor săi, clarificînd totul în cele mai mici amănunte.

Pomul cu pricina, din care a căzut mărul, era arătat tuturor celor care veneau din toate colțurile lumii pentru a-l vedea, iar cînd — de bătrînețe — pomul s-a desfăcut, bucățile au fost împărțite între descendenții lui Newton și admiratorii săi, toți aceștia păstrîndu-le ca pe niște relicve istorice.

Așadar, căderea mărului nu i-a sugerat lui Newton ideea existenței forței gravitaționale, ci doar i-a dat de gîndit pînă unde se întinde această forță și de ce depinde. Newton este primul care a avut ideea unui satelit al Pămîntului construit și lansat de om.

Newton nu a trecut niciodată hotarele patriei sale și nici prea departe de Londra nu a fost vreodată. În schimb, prin camera de lucru se plimba foarte adesea, făcînd kilometri, de parcă ar fi fost discipol al școlii aristotelice[2].

Academia de Științe din Paris îl alege pe Newton ca membru străin al ei. Era o mare onoare pentru el și patria sa, onoare acordată la foarte puțini oameni de știință străini, iar la numai trei ani după aceea (1703) Newton este ales președinte al Societății Regale din Londra, funcție pe care o va deține pînă la moartea sa, în anul 1727. În același timp își păstrează și postul de director al Monetăriei Statului, post pe care-l acceptase în anul 1699. Cu

[1] *Principiile matematice ale filozofiei naturale* de Isaac Newton, traducere de prof. V. Marian, Editura Academiei R.P.R., 1956, p. 427.

[2] Aristotel obișnuia să discute cu discipolii săi probleme filozofice plimbîndu-se prin grădina „Liceumului" fondat de el. De aceea, această Academie a mai fost denumită școală peripatetică (*peripatein* — a se plimba).



cinci ani mai înainte, însă, Newton primise postul de controlor al Monetăriei Statului, calitate în care, în timp de trei ani a reușit să redreseze complet situația monetară a Angliei. Ca urmare, după doi ani a fost numit director. Din 1694 el se instalase la Londra, unde felul său de viață se schimbase. Nu a fost căsătorit niciodată, de căminul său îngrijindu-se nepoata sa Ecaterina.

Regina Ana a Angliei îi acordă, în 1705, titlu de noblețe făcîndu-l baronet și, de aceea, se va numi de aici încolo Sir Isaac.

În anul 1704 apare cartea sa de optică, apoi începe să se îngrijească de edițiile următoare a monumentalei sale opere *Principiile matematice ale filozofiei naturale*.

Între timp se manifestă o polemică ascuțită între Newton și Leibniz cu privire la prioritatea inventării calculului infinitezimal. Polemica s-a declanșat datorită unui tînăr matematician mediocru, pe nume Fatio de Duillier, care, într-o publicație a sa, arată că „Newton este primul învățător, iar Leibniz trebuie să se mulțumească cu rangul doi". Pînă la urmă polemica a fost închisă, însuși Newton recunoscînd că descoperirea a fost făcută independent unul de altul și în același timp. Leibniz moare în anul 1716 în vîrstă de 70 de ani, iar Newton în 1727 în vîrstă de 84 ani și 2 luni, iar matematicienii de după ei gravitau în jurul acestor doi aștri luminoși ai matematicii, certîndu-se între ei, din motive de prioritate asupra descoperirii calculului infinitezimal.

.....

Pe seama lui Newton, din cauza firii sale, au circulat nenumărate anecdote. Se spune că într-una din zile a vrut să-și fiarbă un ou și să măsoare timpul de fierbere. A luat un ou, ceasul și o cană cu apă; după un timp, cînd a presupus că este gata fierberea, s-a uitat pe masă să vadă cît e ceasul. Spre marea sa surprindere, pe masă se afla oul, iar în cană fierbea ceasul. În altă zi, a invitat un prieten la masă. Newton s-a scuzat puțin și a ieșit. Prietenul său, văzînd că nu mai vine și, pe de o parte, fiindu-i foame, iar pe de altă parte nevrînd să-l deranjeze, a mîncat și a plecat. Mai tîrziu intră Newton în sufragerie și văzînd vasele și tacîmurile cu resturi de mîncare pe ele spuse: „Uite, am mîncat și am uitat" și se duse din nou la lucru. În fine, altă dată mergea călare și la poalele unei coline coborî de pe cal ținîndu-l de frîu. Cînd urcușul se termină voi să se urce pe cal. Constată, însă, că avea frîul în mînă, iar calul zburda nu departe de el.

.....

Despre Newton, ca om, nepotul său Humphrey Newton spunea: „Isaac Newton era un om destul de voinic, foarte modest,

foarte blînd și liniștit, niciodată mînios. Comportarea sa era plăcută și simpatică. Era un om de o gîndire adîncă".

Studiind opera lui Newton, Biot îi face următoarea caracterizare: „Ca geometru și ca experimentator, *Newton* era fără egal; prin unirea celor două feluri de geniu în cel mai înalt grad, el este *„incomparabil"*.

Astăzi, însă, el poate fi comparat cu Einstein.

Înainte de a muri, Newton, cu toată modestia ce-l caracteriza, îi spune unui prieten, pe nume Spencer: „Nu știu cum voi apare înaintea lumii, dar mie însumi mi se pare că am fost ca un copil care se juca pe malul mării și, distrîndu-mă, din cînd în cînd am găsit o pietricică mai netedă sau o scoică mai frumoasă decît de obicei, în timp ce marele ocean al adevărului zace nedescoperit înaintea mea"[1].

Newton a încetat din viață în ziua de 31 martie 1727 și a fost înmormîntat cu onoruri pe care le aveau numai regii. Pe monumentul ridicat, în 1731, pe mormîntul său din abația Westminster, au fost înscrise cuvintele: *„Să se felicite muritorii că a existat o astfel și atît de mare podoabă a geniului omenesc"*, iar pe soclul statuii sale de marmură amplasată în holul Universității din Cambridge au fost săpate următoarele cuvinte: „Qui genus humanum ingenio superavit".

Gravitația universală a fost studiată profund de către Einstein, în teoria generală a relativității, dar numai geometric și fiindcă abordarea teoriei gravitației a lui Einstein reclamă vaste și profunde cunoștințe de matematică, ne vom limita numai la o prezentare rezumativă a ei, adică vom căuta să-l facem pe cititorul acestei cărți să înțeleagă esența teoriei. Mai întîi, însă, puțină geometrie. Desigur că, tuturor cititorilor, geometria lui Euclid le este familiară. Pe baza ei putem ușor să construim un triunghi pe o suprafață plană, de exemplu pe o foaie de hîrtie. Știm că suma unghiurilor este de 180° (fig. 54,a). Să rulăm acum foaia în așa fel încît să obținem un cilindru, un con sau alt corp geometric. Suma celor trei unghiuri va fi întotdeauna 180° (fig. 54,b).

Să trasăm acum pe o sferă, un triunghi. Laturile sînt acum curbe, ele putînd fi considerate ca arce ale cercurilor ce iau naștere prin intersecția sferei cu planele ce trec prin centrul ei. Pe sferă laturile reprezintă cel mai scurt drum dintre vîrfuri. De exemplu, la scara globului pămîntesc,

[1] Din *Principiile matematice ale filozofiei naturale*, p. 435.



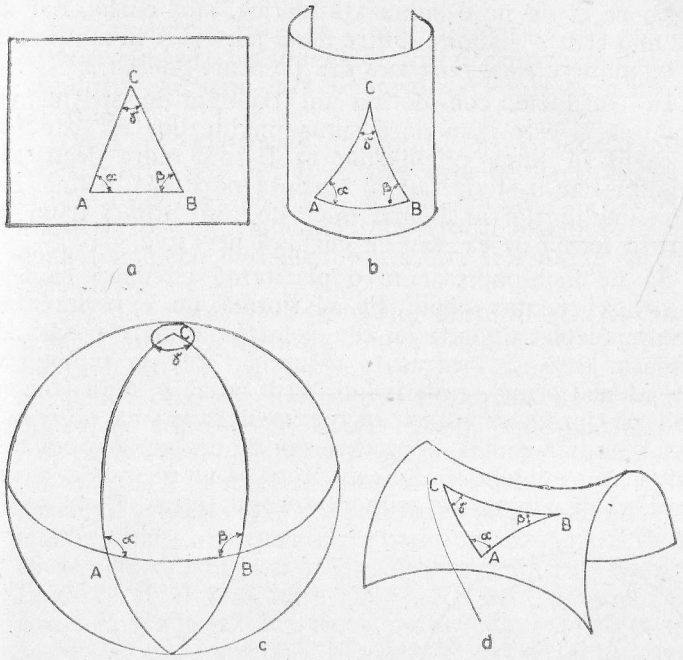



Fig. 54. a — Suma unghiurilor unui triunghi este de 180°.
b — Suma unghiurilor triunghiului este egală cu 180°.
c — Suma unghiurilor triunghiului este mai mare decît 180°.
d — Suma unghiurilor triunghiului este mai mică decît 180°.

drumul cel mai scurt între Paris și New York este marele cerc ce trece prin Paris și New York. Cele spuse aici ne conduc la concluzia că un triunghi sferic este constituit din trei mari cercuri care se întretaie. Suma unghiurilor nu mai este egală cu 180°, ci mai mare decît 180°. Luînd ecuatorul și două meridiane (fig. 54,c) ale Pămîntului, considerat ca o sferă, vom avea

$$\alpha + \beta + \gamma > 180°.$$

Această inegalitate exprimă una din proprietățile triunghiurilor sferice.

În fig. 54,d se arată o suprafață în formă de șa și pe ea un triunghi. În acest caz, suma unghiurilor este mai mică decît 180°. Laturile triunghiului de pe suprafața în formă

de șa, ca și de pe o suprafață sferică, sînt curbe, dar sînt cele mai scurte distanțe dintre două puncte și în matematică ele se numesc *linii geodezice* sau pe scurt *geodezice*.

În concluzie, considerînd un triunghi în spațiu, vom spune că el este plan dacă suma unghiurilor lui este 180°. În cazul că suma unghiurilor ar fi mai mare decît 180°, triunghiul ar fi sferic sau cu curbură pozitivă; în fine, dacă suma unghiurilor ar fi mai mică de 180° atunci triunghiul ar fi în formă de șa sau cu curbură negativă.

Să ne închipuim acum o platformă circulară ca aceea cu călușei pentru copii. Pe platformă un experimentator presupus izolat de exterior (de exemplu, o mare perdea suspendată, care să înconjoare călușeii). Într-un punct oarecare al platformei, experimentatorul așază o sferă (fig. 55). Cînd platforma se rotește, experimentatorul va observa că sfera se mișcă radial, depărtîndu-se de centru. Asupra sferei acționează, evident, forța centrifugă. Dar nu numai asupra sferei, ci și asupra experimentatorului însuși. Cum această

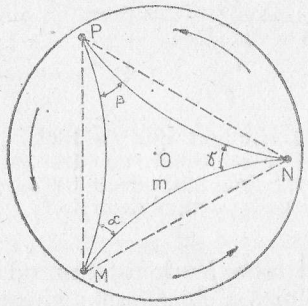



Fig. 55. Măsurarea distanței dintre două puncte de către un observator aflat pe o platformă în rotație uniformă.

forță este direct proporțională cu masa corpului ($F_{cf} = m\omega^2 R$), dacă viteza unghiulară a platformei și depărtarea de la centru la obiect rămîn constante, se poate considera în acest caz o echivalență între forța centrifugă și forța gravitațională, deci și între cîmpurile corespunzătoare acestor forțe. Totuși, cîmpul corespunzător forței centrifuge este oarecum diferit de cîmpul gravitațional al planetelor sau al Soarelui, datorită faptului că forța centrifugă crește proporțional cu distanța față de centrul de rotație ($\omega$ și $m$ constante) și este dirijată radial de la centru spre exterior; forța gravitațională, însă, este o forță de atracție care descrește cu pătratul distanței de la centru [vezi formula (65)];



și încă ceva: în timp ce cîmpul gravitațional are simetrie sferică, cîmpul corespunzător forței centrifuge are simetrie cilindrică (simetria este în jurul axei care coincide cu axa de rotație).

Dacă pe platforma în rotație se produc evenimente fizice, atunci ele pot fi interpretate pe baza teoriei relativității restrînse (speciale) ținînd seama că, așa cum am arătat la p. 40, în teoria relativității restrînse se întîlnesc două fenomene curioase: contracția lungimilor și dilatarea timpului.

Să presupunem că experimentatorul de pe platformă vrea să măsoare distanța dintre punctele $M$ și $N$ (fig. 55). Folosind metrul ca instrument de măsură el va constata că atunci cînd platforma este în repaus, în distanța $MN$ metrul se cuprinde de $a$ ori[1]. Dacă, însă, platforma se va roti cu o viteză unghiulară $\omega$, atunci el va constata că în distanța $MN$ metrul se cuprinde de $b$ ori ($b > a$); aceasta datorită faptului că, din cauza mișcării, metrul s-a contractat. Dacă am așeza rigla mai aproape de axa de rotație, ea s-ar contracta mai puțin, deoarece viteza ei tangențială (liniară) ar fi mai mică ($v = \omega R$); cum $\omega = \text{const.}$, dacă scade $R$, scade și $v$ în aceeași măsură, iar $v$ intră în expresia factorului de contracție. În acest fel, măsurînd distanța $MN$ după curba $MmN$, experimentatorul va găsi că în ea se cuprind $d$ rigle, astfel că $d > a$, cu toate că distanța „reală" este ceva mai lungă decît distanța $MN$. Dacă în $M$ ar fi o sursă de lumină punctuală, atunci pentru ca o rază de lumină să ajungă în $N$ ea va trebui să urmeze drumul $MmN$. Așadar, drumul cel mai scurt dintre punctele $M$ și $N$ este $MmN$, nu $MN$, contrar geometriei lui Euclid. Un exemplu în acest sens îl constituie cazul propagării razei de lumină în interiorul unei rachete cosmice (vezi p. 50). Considerînd echivalența dintre cîmpuri, vom spune că raza de lumină se curbează astfel încît concavitatea este îndreptată înspre sensul creșterii cîmpului gravitațional (în cazul platformei acest cîmp crește de la centru spre periferia ei). Ne întrebăm atunci, pe bună dreptate, ce definiție trebuie să dăm liniei drepte? Știm că linia dreaptă se definește ca distanța cea mai scurtă dintre două puncte sau drumul parcurs de lumină în vid.

[1] Atragem atenția că acesta este un experiment imaginar, pentru a deveni mai ușor inteligibilă problema care ne-am propus-o spre rezolvare.

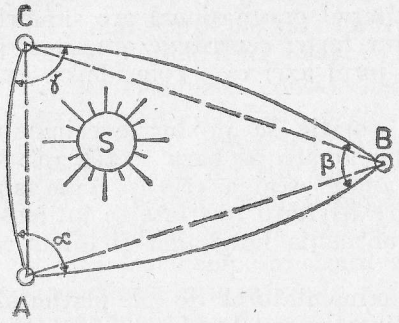



Fig. 56. Curbarea razelor de lumină ce vin de la unele astre, cînd trec prin cîmpul gravitațional al Soarelui.

Einstein a arătat, foarte simplu, că în cazul cîmpului gravitațional se poate menține definiția „liniei drepte", așa cum ne-am obișnuit să o învățăm și în loc să spunem că drumul urmat de lumină este curb sau că distanța cea mai scurtă dintre două puncte este o curbă, va trebui să spunem că *spațiul însuși este curb*. Știm cu toții ce este o linie curbă, o suprafață curbă, dar este foarte dificil să ne imaginăm un spațiu tridimensional curb și cu atît mai dificil un spațiu cvadridimensional în care a patra coordonată este timpul.

Considerînd acum un triunghi uriaș cu vîrfurile pe trei aștri și laturile raze de lumină trecînd prin cîmpul gravitațional al Soarelui, acest triunghi va arăta ca în fig. 56, deoarece razele se curbează, iar concavitatea este îndreptată înspre sensul creșterii cîmpului gravitațional (în cazul acesta spre centrul Soarelui). Suma unghiurilor este mai mare decît 180°.

Se poate spune că spațiul din jurul Soarelui este curbat în sens pozitiv, iar lumina se propagă după geodezice. În cîmpul forței centrifuge, cîmp echivalent cu un cîmp gravitațional (cazul platformei în mișcare de rotație), spațiul este curbat în sens negativ, suma unghiurilor fiind mai mică decît 180°.

Prin urmare, cînd razele de lumină provenite de la stele trec prin apropierea Soarelui sînt deviate de la direcția lor inițială, sînt curbate; efectul este denumit *efect Einstein*. Aceasta înseamnă că poziția stelelor în absența Soarelui trebuie să difere de poziția lor în prezența Soarelui, în aceeași regiune a cerului. Pentru a putea observa acest lucru, astronomii au fost nevoiți să se folosească de eclipsele totale de Soare. Ei au fotografiat un grup de stele din apropierea



Soarelui în timpul unei eclipse totale și apoi au fotografiat același grup de stele noaptea. Din compararea pozițiilor au dedus unghiul de deviere. Primele cercetări în acest sens au fost întreprinse de cercetători englezi, cu prilejul eclipsei de Soare din 1919 și reluate de alți cercetători în anii 1922, 1929, 1936, 1947, 1952, ... Rezultatele obținute de fiecare dată, cu toate că precizia măsurătorilor creștea, au fost aceleași: devierea razelor de lumină cînd trec prin vecinătatea Soarelui a fost de $1''98 \pm 0''12$, $1''61 \pm 0''30$ ș.a.m.d. Valoarea medie $1''79$. Valoarea dată prin calcul de către Einstein era de $1''74$. Se observă o foarte mare apropiere între aceste valori. În anul 1919, la 6 noiembrie, membrii ambelor Societăți Regale de astronomie, a celei britanice (Societatea Regală Britanică este Academia de Științe din Londra) și a celei londoneze, s-au întrunit într-o ședință comună, prezidată de sir Joseph John (pe scurt „Ji-Ji") Thomson, unul dintre corifeii fizicii experimentale și seniorul fizicii europene în acea vreme. Thomson a comunicat valorile unghiurilor de deviere obținute în 1919, în ziua de 29 mai și media lor. Apoi, valoarea prevăzută de Einstein[1]. Peste întreg auditoriul s-a lăsat o tăcere profundă. Cu acest prilej, Thomson a spus între altele: „Este vorba de descoperirea, nu a unei insule îndepărtate, ci a unui întreg continent al noilor idei științifice. Este cea mai mare descoperire în problema gravitației, de cînd au fost formulate principiile lui Newton"[2].

Pentru a ne da seama de micimea unghiului de deviere a razelor de lumină, vom da exemplul următor: el reprezintă unghiul sub care se vede un om de statură mijlocie, de la distanța de 200 km.

Să trecem acum la cel de al doilea efect relativist și anume, dilatarea timpului. Vom apela, de asemenea, la platforma circulară pe care așezăm două ceasornice identice: unul în $O$, altul în $M$ (fig. 57). Ceasornicul din $M$ are o anumită viteză tangențială, în timp ce acela din $O$ are viteza tangențială nulă. Așa fiind, ceasornicul din $M$ rămîne în urmă față de cel din $O$. Dar asupra ceasornicului din $M$

[1] Întrebat în 21 mai 1919, ce s-ar fi întîmplat dacă devierea razelor nu s-ar fi constatat în urma observațiilor și fotografiilor făcute, Einstein a răspuns: „Mi-ar fi părut rău pentru natură, teoria mea e corectă".

[2] *Bazele fizice ale relativității einsteiniene* de N. Bărbulescu, Editura științifică și enciclopedică, București, 1975, p. 189.

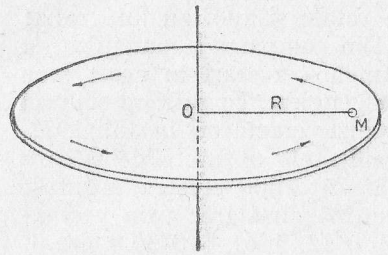



Fig. 57. Ceasul din *M* rămîne în urmă față de ceasul din *O*.

acționează forța centrifugă, deci acesta se află într-un cîmp echivalent cîmpului gravitațional și acest cîmp este cu atît mai intens cu cît este mai mare depărtarea față de *O*. Rezultă de aici că și într-un cîmp gravitațional mersul unui ceasornic va depinde de poziția acestuia față de corpul ce creează cîmpul. Cu cît masa corpului este mai mare cu atît cîmpul gravitațional creat este mai intens. De asemenea, cîmpul este mai intens în apropierea corpului și scade cu distanța față de corp. De exemplu, cîmpul gravitațional al Pămîntului este cu atît mai intens cu cît ne apropiem de suprafața solului și mai „slab" la distanță față de sol. Înseamnă că un ceasornic aflat în cîmpul gravitațional al Pămîntului va merge cu atît mai încet cu cît se va afla mai aproape de suprafața solului. Și fenomenele fizice, chimice, procesele biologice se desfășoară mai încet în cîmpuri gravitaționale intense.

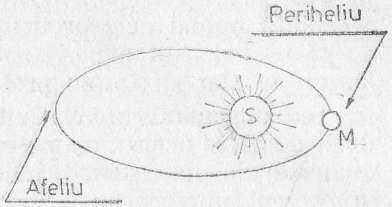
Cele expuse pînă aici constituie baza teoriei geometrice a gravitației dată de Einstein. Aici, așa cum am văzut, nu se mai aplică geometria euclidiană, ci o altă geometrie, denumită *riemanniană* și, așa cum am arătat, în cîmpul gravitațional drumul urmat de lumină este o geodezică (la fel distanța cea mai mică dintre două puncte).

După Newton, datorită masei mari a Soarelui și, evident, cîmpului gravitațional extrem de intens, planetele descriu traiectorii eliptice și nu linii drepte. După teoria gravitației a lui Einstein, spațiul este curb, iar planetele descriu geodezice, adică liniile „cele mai drepte" în acest spațiu.

O problemă deosebit de importantă, care a dat multă bătaie de cap astronomilor, a fost aceea a deplasării periheliului planetei Mercur (prima planetă a sistemului nostru solar). *Periheliul* este punctul cel mai apropiat de Soare



Fig. 58. Pentru explicarea mișcării periheliului planetei Marte.




de pe traiectoria unei planete (punctul cel mai îndepărtat se numește *afeliu*) (fig. 58).

Astronomii au observat că poziția acestui punct nu este fixă față de un referențial legat de Soare. Acest punct se deplasează în mod continuu în planul elipsei, efectuînd o rotație completă de 3 milioane de ani. De aceea, traiectoria rezultantă descrisă de Mercur are forma unei rozete. Acest lucru este valabil pentru toate planetele. Newton a arătat că deplasarea periheliului unei planete se datorește influenței celorlalte planete din sistemul solar. Rezultatele calculelor făcute cu ajutorul teoriei lui Newton sînt în bun acord cu observațiile pentru toate planetele, exclusiv planeta Mercur. Pentru această planetă, periheliul trebuie să avanseze cu 532″ în fiecare secol, după calculele făcute cu ajutorul teoriei lui Newton. Astronomii însă au obținut, pe baza observațiilor directe, un avans de 574″ pe secol (Le Verrier, 1859). Așadar, apărea o diferență de 42″, care a putut fi explicată abia în anul 1916 de Einstein. Acesta a găsit, teoretic, exact această diferență, scoțînd astfel din impas astronomia teoretică, ceea ce a reprezentat un triumf excepțional al teoriei gravitației a lui Einstein. Au fost multe alte verificări[1] ale acestei teorii, toate confirmînd-o în mod cu totul remarcabil. De aceea, Einstein este considerat ca întemeietor al *cosmologiei moderne*.

În luna februarie a anului 1916, după ce Einstein explică acea diferență de 42″ privind mișcarea periheliului planetei Mercur, îi scrie într-o scrisoare lui Paul Ehrenfest (1880—1933): „Închipuie-ți bucuria mea cînd am obținut mișcarea periheliului planetei ca fiind exact aceea care trebuie să fie! Timp de o săptămînă nu mai puteam de emoție și bucurie. Acum mi-a trecut..."

[1] Cititorilor care doresc amănunte le recomandăm lucrarea citată la p. 216, p. 190—191 sau *Teoria spațiului, timpului și gravitației* de V.A. Fock, Ed. Acad. R.P.R., Buc., 1962, p. 331—340.

Teoria geometrică a gravitației dată de Einstein este acceptată numai de teoreticieni și puțin, sau chiar de loc, de către fizicienii experimentatori, care afirmă că ea nu lămurește clar și simplu problema gravitației.

Teoria generală a relativității nu poate fi aprofundată decît de către aceia care posedă în mod temeinic cunoștințe avansate de matematică, îndeosebi calculul tensorial. Pînă în prezent, nimeni nu a încercat să reducă abstractizarea maximă a acestei teorii pentru a putea fi expusă la un nivel mai ușor accesibil, spre deosebire de teoria relativității restrînse, care în prezent poate fi expusă în mod inteligibil la un nivel mediu și este chiar prezentată succint în manualele de fizică pentru liceu (la noi în țară, în manualele de clasa a XII-a).

După Max Born, celebrul fizician teoretician german, teoria generală a relativității reprezintă „...cea mai mare realizare a gîndirii umane despre natură, îmbinarea cea mai uimitoare a profunzimii filozofice, a intuiției fizice și a măiestriei matematice"[1].

## LEGEA GAZULUI PERFECT ȘI LEGILE GAZELOR REALE

Se știe că substanța se poate găsi în următoarele stări: solidă, lichidă, gazoasă, plasmă. În cele ce urmează ne vom opri îndeosebi asupra stării gazoase și numai tangențial vom descrie starea lichidă și solidă. Studiul stărilor de agregare ale substanței se face ținîndu-se seama de existența moleculelor și a forțelor intermoleculare.

Multă vreme s-a crezut că molecula este o particulă elementară, adică o particulă care nu se mai poate divide. Ulterior, însă, caracterul „elementar" a trecut asupra atomului și în cele din urmă asupra particulelor elementare ca electron, proton, neutron etc. Rezultă că noțiunea de „elementar" atașată unei particule are caracter provizoriu, fiind legată de nivelul de cunoștințe existent la un moment

[1] Max Born, *Fizica în concepția generației mele*, Editura științifică și enciclopedică, București, 1969, p. 246.



dat și de posibilitățile tehnice de care dispunem. De exemplu, caracterul „elementar" a trecut asupra electronului după ce această particulă a fost descoperită[1] și s-a dovedit că face parte din structura atomului. Evident, descoperirea a depins de pregătirea științifică și preocupările cercetătorului și de aparatura de laborator pe care a avut-o la acea vreme. Cercetătorul care a descoperit electronul a fost savantul englez J.J. Thomson (1856—1940), laureat al premiului Nobel în anul 1906.

Astăzi putem defini *molecula* ca *cea mai mică particulă de substanță, formată din 1, 2, 3 sau mai mulți atomi, capabilă să existe independent*. Molecula este ultima particulă care mai poate fi descompusă în altele prin procedee chimice obișnuite. Există molecule compuse din zeci și chiar sute de mii de atomi, cum sînt moleculele albuminelor. Există chiar și molecule dintr-un milion de atomi: moleculele de hemocianină, substanță existentă în sîngele unor melci. Aceste molecule gigant au dimensiunile transversale de $10^{-2}$ μm. În interiorul moleculei atomii sînt legați prin forțe intramoleculare. La rîndul lor, moleculele sînt legate între ele prin forțe intermoleculare, de coeziune, numite *forțe Van der Waals* (denumirea provine de la numele fizicianului olandez Van der Waals, primul cercetător care a ținut seama de ele atunci cînd a stabilit ecuația de stare a gazelor reale). Atît forțele chimice, cît și forțele Van der Waals se datoresc interacțiunii electronilor și nucleelor și, de aceea, deosebirea dintre ele este oarecum convențională.

Se cunoaște, în prezent, o foarte mare varietate de molecule. Chimiștii au reușit să creeze în laborator milioane de substanțe formate din molecule diferite.

Am arătat că moleculele sînt alcătuite din atomi și că între ei există forțe chimice de legătură. Numărul atomilor din moleculă împreună cu ordinea și configurația legăturilor dintre ei determină proprietățile moleculei. Fiecare atom din moleculă efectuează oscilații în jurul poziției sale de echilibru. Există cazuri în care unele părți ale moleculei se pot roti în raport cu alte părți, ceea ce conferă moleculei libere, în timpul mișcării sale termice, diferite configurații dintre cele mai bizare.

[1] Electronul a fost descoperit în radiația catodică, în anul 1895.

Considerînd o moleculă formată din doi atomi și reprezentînd grafic variația energiei potențiale a moleculei în funcție de distanța dintre atomi, se obține curba din figura 59. Unul dintre atomi se consideră în originea $O$ a sistemului de coordonate. Se observă că energia moleculei scade repede la o creștere mică a distanței dintre atomi, trece printr-un minim și apoi crește apropiindu-se tot mai mult de axa absciselor. Se observă că regiunea din jurul minimului are aspectul unei gropi și, de aceea, se numește *groapă de potențial*. Așa cum se știe, un corp se află în stare stabilă atunci cînd energia lui potențială este minimă. În moleculă, atomii constituenți se găsesc în groapa de potențial. Aici ei efectuează oscilații termice în jurul poziției lor de echilibru. Dacă această mișcare de oscilație ar înceta, atunci ei s-ar așeza la distanța $r_e$ unul de altul, adică atomii s-ar găsi pe „fundul" gropii de potențial. Aceasta corespunde stării stabile de echilibru a moleculei; în această situație forțele de atracție și forțele de respingere, dintre cei doi atomi, se echilibrează. De aceea, distanța $r_e$ se numește *distanță de echilibru*. Analiza atentă a curbei din figura 59 oferă o multitudine de informații privind interacțiile dintre molecule. De pildă, cînd atomii se găsesc la o distanță mai mică decît $r_e$, între ei se exercită forțe de respingere, iar dacă se află la o distanță mai mare decît $r_e$, unul de altul, între ei se manifestă forțe de atracție. Așadar, curba de variație a energiei potențiale cu distanța dintre atomi ne spune în ce situații între atomi se exercită atracții și în ce situații se exercită respingeri. Dar această curbă ne mai permite să determinăm și intensitatea forței de interacție și cum variază ea. De exemplu, dacă panta curbei este mare (de pildă în punctul $A$) înseamnă că intensitatea forței de interacție este mare și, invers, acolo unde panta curbei este mică, forța de interacție este mică.

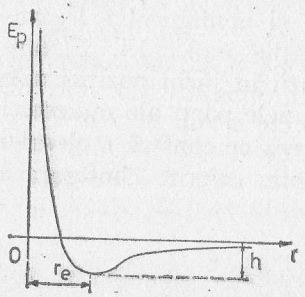



Fig. 59. Variația energiei potențiale în cazul unei molecule formată din doi atomi în funcție de distanța dintre aceștia.



Cînd atomii se apropie la distanță mai mică decît $r_e$, forțele de respingere cresc brusc și din această cauză distanța dintre atomi nu se mai poate micșora. Distanța $r_e$ diferă de la atomi la atomi, fiind cuprinsă între 1 Å și 4 Å. De exemplu, pentru molecula de oxigen $r_e = 1{,}2$ Å. Dar nu numai $r_e$ diferă, ci și adîncimea gropii de potențial, $h$. Cu cît aceasta este mai mare cu atît energia pe care trebuie să o primească atomul din exterior pentru a ieși din această groapă este mai mare și, invers, cu cît adîncimea este mai mică cu atît energia care trebuie să i se comunice atomului pentru a părăsi groapa de potențial este mai mică. Pentru acest motiv energia corespunzătoare adîncimii gropii de potențial se numește *energie de legătură*. Fiindcă energia de legătură a unei molecule este foarte mică, infimă, ea se calculează din energia de legătură a unui kilomol. Un kilomol dintr-o substanță reprezintă o cantitate, care — exprimată în kilograme — este egală cu masa moleculară relativă a substanței respective. Să dăm un exemplu: un kilomol de oxigen este egal cu 32 kg. Energia de legătură pentru o moleculă se obține împărțind 1 kilomol la numărul lui Avogadro ($N = 6{,}023 \cdot 10^{26}$ molecule/kmol). Energia de legătură în sistemul internațional de unități de măsură[1] *(SI)* se exprimă în J/kmol. În cazul moleculei de oxigen energia de legătură dintre atomi este egală cu $2{,}784 \cdot 10^7$ J/kmol, iar pentru molecula de hidrogen este $2{,}472 \cdot 10^7$ J/kmol. Se observă că diferența nu este prea mare. În general, energia de legătură a atomilor în moleculă, ca și distanța dintre atomi, diferă puțin una de alta.

Atomii în moleculă au o așezare bine determinată unii față de alții și diferă de la moleculă la moleculă, determinînd în unele cazuri structuri complexe ale moleculelor. De exemplu, în cazul apei ($H_2O$), molecula are forma din figura 60,a; în vîrful unghiului se află atomul de oxigen. În figura 60,b se arată molecula de bioxid de carbon ($CO_2$); la mijloc este atomul de carbon. Molecula de amoniac ($NH_3$) are forma unei piramide cu baza un triunghi, atomul de azot găsindu-se în vîrful ei. În fine, figura 60,c arată molecula de benzen ($C_6H_6$). Așa cum se vede, atomii de carbon se găsesc în vîrfurile unui hexagon regulat; de la ei pleacă legăturile la atomii de hidrogen. Ca și la molecula de apă și de bioxid de carbon și aici toți atomii se găsesc în același plan.

[1] La noi în țară SI a devenit legal și obligatoriu prin H.C.M. nr. 550/1961.

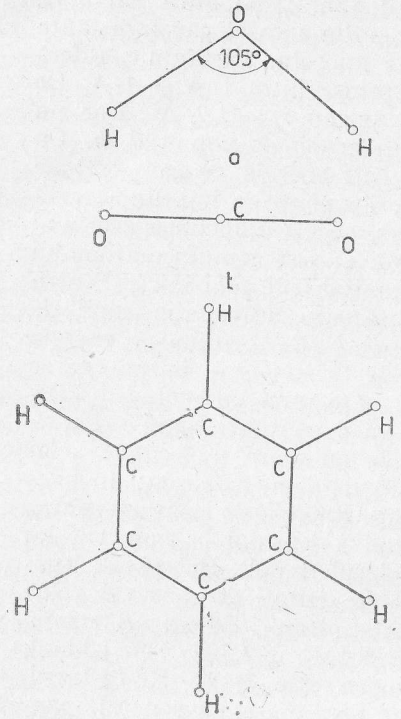



Fig. 60. Forma unor molecule, reprezentată schematic.

Între molecule există legături chimice și se exercită forțe de atracție denumite, cum am văzut, forțe Van der Waals. Dacă aceste forțe ar lipsi, lichidele și solidele nu și-ar mai păstra volumul propriu, s-ar descompune în molecule. Experiența demonstrează limpede că atît lichidele, cît și solidele au volum propriu și, în plus, corpurile solide au și formă proprie. Să ne întrebăm acum ce s-ar întîmpla dacă forțele de respingere ar lipsi? Corpurile solide și lichide ar fi foarte ușor compresibile. Or, în realitate aceste corpuri sînt foarte greu de comprimat, ceea ce atestă existența forțelor de respingere. Aceste exemple dovedesc în mod neîndoielnic existența forțelor de interacțiune moleculară.

Să considerăm un sistem de două molecule dintr-un gaz și să studiem cum variază forța rezultantă de interacțiune dintre molecule în funcție de distanța dintre ele. Graficul acestei variații ar arăta ca în figura 61. Se observă că graficul se aseamănă cu acela din figura 59. Cînd distanța dintre



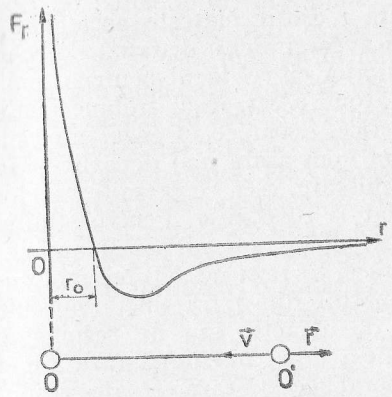



Fig. 61. Variația lui $F_r$ cu distanța $r$.

moleculele gazului este egală cu $r_0$, interacțiunile atractive sînt egale cu interacțiunile repulsive și forța rezultantă de interacțiune este nulă[1]. Dacă $r \to \infty$, atunci $F_r \to 0$, iar dacă $r < r_0$ forțele repulsive între molecule sînt mult mai mari decît cele atractive. În fine, cînd moleculele reușesc să se apropie la o distanță mai mică decît $r_0$ și anume la o distanță $r_0 = d$ (unde $d$ reprezintă distanța minimă la care se pot apropia moleculele), se produce ciocnirea dintre ele. Această distanță depinde de viteza cu care se deplasează moleculele. În figura 62 se arată cazul cînd are loc ciocnirea. Se observă că nu este vorba de ciocnirea moleculelor propriu-zise, ci ciocnirea a două „sfere" concentrice cu moleculele, $d$ fiind diametrul acestor sfere. În momentul ciocnirii aceste sfere devin *tangente*. În baza celor arătate, ciocnirea dintre două molecule este modelată prin ciocnirea a două sfere rigide, fiecare avînd diametrul $d$.

Să studiem acum modul în care variază energia potențială a unui sistem format din două molecule, una considerată mobilă, iar cealaltă în mișcare cu viteza $\vec{v}$. Graficul

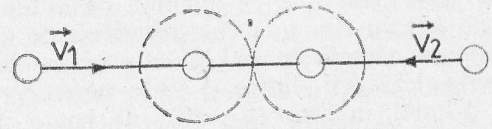



Fig. 62. Ciocnirea moleculelor.

[1] Forțele atractive se consideră negative (sînt orientate în sensul negativ al axei $Ox$), iar forțele repulsive se consideră pozitive.

de variație al $E_p$ cu distanța $r$ dintre ele este asemănător cu acela din figura 59. Vom avea și aici o distanță de echilibru, iar studiul ar fi asemănător cu cel făcut pentru atomii dintr-o moleculă avînd doi atomi. Aici, însă, trebuie analizată și variația energiei cinetice, deoarece în gaze, moleculele — așa cum se știe și cum vom arăta mai departe — au o foarte mare mobilitate de mișcare, ceea ce permite gazelor să ocupe întregul volum aflat la dispoziție. Pentru studiul propus trebuie să introducem două noțiuni noi și anume: a) sfera de acțiune moleculară și b) raza de acțiune moleculară, $r$. Prima reprezintă spațiul din jurul unei molecule în care se manifestă forțe de atracție sau de respingere asupra altor molecule. Cea de-a doua înseamnă raza sferei de acțiune moleculară. În general această rază este de ordinul $10^{-9}$ m.

Și acum să vedem cum variază energia potențială și respectiv energia cinetică a sistemului celor două molecule în funcție de raza de acțiune moleculară. Fie $\vec{v}$ viteza cu care cele două molecule se apropie una de alta. Atît timp cît distanța $d$ dintre ele este mai mare decît raza de acțiune moleculară $r$, între molecule nu se manifestă forțe de interacțiune. Dacă $r > d > r_e$, atunci acționează forțe de atracție, ceea ce determină o creștere a vitezei moleculare și deci o creștere a energiei cinetice; energia potențială, însă, scade. Cînd $d = r_e$, forța de interacțiune este nulă, forțele de atracție și de respingere își fac echilibru. Energia potențială va fi minimă, iar viteza și respectiv energia cinetică va fi maximă. Cînd $d < r_e$ forța de respingere domină, energia potențială crește brusc, iar viteza și energia cinetică scad. Prin urmare, energia cinetică se transformă în energie potențială și invers.

Dar între interacțiunile dintre molecule și interacțiunile dintre atomi există și o deosebire esențială. De exemplu, distanța de echilibru dintre atomii de oxigen dintr-o moleculă este de 1,2 Å, în timp ce distanța de echilibru dintre doi atomi de oxigen din molecule diferite este de 2,9 Å[1]. Pentru a separa atomii de oxigen dintr-o moleculă, deci pentru ruperea legăturii dintre ei, este necesară o energie de $2{,}4 \cdot 10^7$ J/kmol, în timp ce pentru a separa două molecule de oxigen este necesară o energie de $0{,}048 \cdot 10^7$ J/kmol,

[1] Denumirea ångströmului vine de la numele savantului suedez A. J. Ångström (1814—1874).



deci de peste 50 ori mai mică. Aceasta ne spune că groapa de potențial este mai depărtată de axa ordonatei (vezi figura 59) și este mai puțin adîncă ($h$ mic).

Într-o moleculă se unesc atomi de un fel cu atomi de alt fel sau atomi de același fel într-un număr foarte bine determinat, astfel încît un alt atom peste acest număr determinat nu se poate adăuga. De exemplu, o moleculă de apă ($H_2O$) este formată din doi atomi de hidrogen și un atom de oxigen. Peste acest număr de atomi nu se poate adăuga un alt atom nici de oxigen, nici de hidrogen. Un alt exemplu: doi atomi de oxigen formează o moleculă; un alt atom este imposibil de adăugat. În cazul moleculelor nu se întîlnește așa ceva. Moleculele au, așa cum am văzut în exemplele date, diverse „forme" și deci și anumite „dimensiuni". „Dimensiunea" moleculelor este chiar distanța de echilibru.

Spre deosebire de lichide sau solide, în gaze forța de interacțiune intermoleculară este în general foarte mică. Energia cinetică a moleculelor este foarte mare, ceea ce permite gazelor să ocupe întreg spațiul în care se găsesc. Gazele nu au nici volum, nici formă proprie. Starea de agregare gazoasă reprezintă un exemplu al dezordinii totale și absolute care există în natură, în privința poziției și mișcării particulelor. De altfel, denumirea de gaz derivă de la cuvîntul grecesc „haos", care înseamnă *dezordine*.

Moleculele gazelor se găsesc la mare distanță unele de altele și anume, în cazul aerului, la presiune și temperatură normală, la o distanță de 10 ori mai mare decît dimensiunea lor transversală. Cum o moleculă de oxigen sau de azot (aceste gaze constituie părți principale ale aerului) are dimensiunea de 4 Å, urmează că distanța dintre moleculele din aer este de 40 Å, iar fiecărei molecule îi revine un volum de aer de 1 000 ori mai mare decît volumul unei molecule. (Se calculează foarte ușor observînd că distanța dintre molecule este de 10 ori mai mare decît dimensiunea moleculei și deci volumul din jurul ei este de 1 000 de ori mai mare decît volumul moleculei.) Dacă pe 1 m² ar fi în mișcare dezordonată circa 100 de furnici, furnicile corespunzînd moleculelor de gaz, atunci pe o suprafață cît pagina unei cărți de format normal ar reveni o furnică sau două. Așa fiind, furnicile s-ar găsi la o distanță mare unele de altele. La fel de depărtate între ele sînt moleculele de gaz, fiecare moleculă fiind antrenată de o mișcare termică ce nu încetează decît la temperatura de zero absolut, adică la temperatura de

—273,15°C, continuîndu-se mișcarea numai în interiorul moleculelor. Dar mișcarea termică a moleculelor este o mișcare agitată, o mișcare în care direcția de deplasare a acestora se schimbă necontenit din cauza deselor ciocniri dintre ele. În funcție de densitatea gazului și de dimensiunile moleculei se poate calcula lungimea drumului liber parcurs de o moleculă între două ciocniri succesive. Valoarea numerică a acestui drum nu este constantă și, de aceea, se ia media valorilor și este denumită *drum liber mediu* și se notează cu $\overline{\lambda}$. În cazul oxigenului $\overline{\lambda} = 500$ Å, iar pentru hidrogen $\overline{\lambda} = 1\,100$ Å. Comparînd $\overline{\lambda}$ cu dimensiunile moleculelor constatăm că drumul liber mediu este foarte mare. În cazul oxigenului $\overline{\lambda}$ este de 125 ori mai mare decît dimensiunea moleculei. Dacă am dispune de un aparat capabil să mărească moleculele de oxigen pînă la dimensiunea unei mingi de tenis de masă (3,7 cm), atunci $\overline{\lambda}$ ar fi de aproximativ 5 m (exact 4,625 m). Prin urmare, distanța medie pe care o parcurge o moleculă între două ciocniri succesive este enorm de mare în comparație cu dimensiunea ei transversală.

În lichide, moleculele nu au mobilitatea moleculelor de gaz; ele sînt mult mai apropiate și în continuă stare de mișcare termică, dezordonată, pe distanțe mici. De exemplu, în cazul apei[1] o moleculă parcurge o distanță de 230 de ori mai mică decît ar parcurge o moleculă de gaz în același interval de timp. Dacă lichidul este mai vîscos, ca uleiul, de pildă, distanța parcursă de o moleculă în același interval de timp este mai mică decît distanța parcursă de o moleculă de apă.

În cazul solidelor, molecula oscilează continuu în jurul nodurilor rețelei cristaline, oscilațiile de acest tip fiind numite *fononice*. În aceasta constă mișcarea lor termică. În teoria cuantică a corpului solid se arată că oscilațiilor termice ale rețelei cristaline li se asociază niște cvasiparticule denumite *fononi*[2]. De aceea, corpul solid se poate considera ca un sistem fononic, adică un sistem în care moleculele și atomii pot fi tratați ca un ansamblu de oscilatori armonici. Aceasta explică de ce corpurile solide au, pe lîngă volum propriu ca și lichidele, și formă proprie.

[1] Apa este un lichid foarte „mobil".

[2] Tot așa cum oscilațiilor luminoase (undelor electromagnetice) li se asociază fotonul.



În interiorul moleculelor, atomii efectuează, — așa cum am arătat la început — mișcări oscilatorii, indiferent de starea de agregare a substanței, iar moleculele au și o mișcare de rotație în jurul propriei lor axe (exclusiv moleculele monoatomice). Ținînd seama de cele expuse pînă aici, vom spune că fiecare moleculă are energii corespunzătoare fiecărei mișcări ce o efectuează. Astfel, fiecare moleculă are o energie cinetică și potențială de oscilație, o energie cinetică de rotație, o energie cinetică de translație. Energia potențială a moleculelor este considerată zero cînd moleculele se află la o distanță mare una de alta, adică la o distanță care depășește raza de acțiune moleculară și diferită de zero dacă molecula se află în sfera de acțiune moleculară a alteia. Suma acestor energii, cinetică și potențială, la care se adaugă și alte forme de energie pe care le au moleculele unei substanțe, precum și energia nucleară, formează la un loc *energia internă* a substanței respective. În studiul gazelor perfecte, așa cum vom vedea, se ia în considerare numai energia cinetică a moleculelor și deci suma acestor energii va determina energia internă a gazului.

În concluzie, putem spune că în gaze moleculele sînt libere, că au o foarte mare mobilitate (la presiuni mari se adună în grupuri) și deci structura este neregulată și nelegată. Lichidele, însă, și corpurile amorfe prezintă o structură neregulată și legată, deoarece la astfel de substanțe moleculele au mișcări dezordonate ca și în gaze, dar pe distanțe mici, iar fiecare moleculă este în contact cu altele. În fine, corpurile solide cristaline au o structură regulată (cristalele prezentînd diverse forme geometrice regulate) și legată (moleculele nu părăsesc nodurile rețelei cristaline, ci execută mișcări oscilatorii în jurul poziției lor de echilibru).

În cele ce urmează ne vom ocupa de gazele perfecte (ideale) și legea generală care le guvernează.

Gîndindu-ne la definiția noțiunii de gaz, zîmbim desigur văzînd lîngă termenul „gazele", adjectivul „perfecte" și ne întrebăm dacă este corect, deoarece adjectivul perfect înseamnă, evident, ceva care întrunește toate calitățile cerute. Cunoscînd faptul că, cu cît o schemă este mai simplă cu atît este mai perfectă, deoarece simplifică calculele și explicarea fenomenelor fizice se face mai ușor, vom înțelege că noțiunea de gaz perfect se referă la modelul cel mai simplu al unui gaz. Ca exemplu de gaz perfect putem considera un gaz destul de rarefiat.

Gazului perfect i se atribuie o serie de proprietăți care se verifică experimental destul de bine:

1°. *Gazul perfect este alcătuit din molecule.* Toate moleculele au aceeași masă $m$, deci sînt identice, iar numărul lor este foarte mare. Într-un $cm^3$ de gaz, la presiune și temperatură normală, se găsesc $2{,}7 \cdot 10^{19}$ molecule. De aceea studiul lor se face folosind metoda statistică.

2°. *Dimensiunile moleculelor sînt de ordinul 1 Å și la presiuni mici se consideră neglijabile în comparație cu drumul liber mediu.* De asemenea, volumul moleculelor se neglijează față de volumul vasului în care este închis gazul. (Drumul liber mediu este invers proporțional cu presiunea. La presiuni mari, de exemplu la presiune normală, $\bar{\lambda} \approx 2 \cdot 10^{-7}$ m, iar la presiune mică de exemplu $p = 10^{-4}$ pascali, $\bar{\lambda} = 70$ m.)

3°. *Moleculele se găsesc într-o continuă stare de mișcare dezordonată, aleatoare (întîmplătoare) și lor li se aplică legile newtoniene ale mișcării.*

Între două ciocniri succesive moleculele se mișcă după traiectorii rectilinii, iar durata unei ciocniri ($\sim 10^{-12}$ s) este neglijabilă în comparație cu intervalul de timp dintre două ciocniri succesive.

4°. *Moleculele sînt considerate punctiforme (v. pct. 2°).* Ciocnirile dintre ele și ciocnirile de pereții vasului în care este închis gazul au loc după legile ciocnirii elastice: *legea conservării energiei mecanice* și *legea conservării impulsului.*

5°. *Moleculele unui gaz aflat în echilibru termic au viteze ce corespund distribuției maxweliene.*

6°. *Asupra moleculelor nu acționează forțe apreciabile decît în timpul unei ciocniri.* Atît timp cît aceasta este adevărat, moleculele se mișcă rectiliniu și uniform între două ciocniri succesive. Întreaga energie a moleculelor este energie cinetică și ea se transformă în energie potențială în timpul ciocnirii, iar aceasta la rîndul ei se transformă în energie cinetică.

7°. *Moleculele unui gaz închis într-o incintă se ciocnesc și de pereții acesteia.* Dacă drumul liber mediu este mai mare decît dimensiunea transversală a incintei, atunci moleculele se ciocnesc numai de pereți și se spune că în incintă este vid. Dacă, însă, drumul liber mediu este mai mic decît dimensiunea transversală a incintei, atunci au loc ciocniri între molecule și între acestea și pereții incintei.



Pentru a defini starea unui gaz, în general a unui *sistem termodinamic*[1] se folosește un grup finit de mărimi fizice independente între ele, numite *parametri de stare* ai sistemului. Cunoașterea acestor parametri prezintă mare importanță, deoarece cu ajutorul lor se poate face deosebire dintre două stări ale aceluiași sistem.

Starea unui gaz, de exemplu, se definește prin valorile a trei parametri: volumul $V$, presiunea $p$, temperatura $T$, cu condiția ca gazul să fie în echilibru termic[2]. Dacă la scara macroscopică un gaz este în repaus față de incinta în care este închis și se află în stare de echilibru termic, atunci se spune că gazul este în *stare de echilibru termodinamic* sau pe scurt *stare de echilibru.*

Cînd un gaz trece dintr-o stare de echilibru în altă stare de echilibru, valorile parametrilor ce caracterizează cele două stări fiind diferite de la o stare la alta, se spune că gazul suferă o *transformare de stare.* Parametrii de stare corespunzătoare celor două stări ale sistemului, între care are loc transformarea, sînt legați între ei printr-o expresie matematică denumită *legea transformării respective.* În cazul gazelor perfecte sînt cunoscute: *legea transformării izoterme,* în care parametrii de stare sînt presiunea, $p$, și volumul, $V$: *legea transformării izocore,* care exprimă legătura între presiune și temperatură; *legea transformării izobare,* care leagă între ei parametrii de stare $V$ și $T$; *legea generală a gazelor perfecte,* care exprimă legătura între $p$, $V$ și $T$. Toate aceste legi se exprimă prin fraze, așa cum se va vedea la momentul oportun.

a) *Transformarea izotermă* (legea Boyle-Mariotte[3]), $T =$ = const. Fie un corp de pompă cu piston avînd în interior un kilomol dintr-un gaz și fie $V_0$ și $p_0$, volumul și respectiv presiunea la momentul inițial. Să presupunem acum că apăsăm pe piston pînă cînd volumul gazului se reduce la

[1] Sistemul format din unul, două sau mai multe corpuri macroscopice aflate în interacțiune de natură mecanică, termică, electrică, magnetică etc., delimitat în mod convențional de mediul ambiant și care se comportă ca un întreg în timpul evoluției sale. De exemplu, o masă de gaz închisă într-o incintă, un lichid într-un vas constituie sisteme termodinamice.

[2] Un gaz este în echilibru termic atunci cînd în toată masa sa atît temperatura cît și presiunea au, fiecare, aceeași valoare.

[3] Edmé Mariotte (1620–1684), fizician francez, membru al Academiei de Științe din Paris.

jumătate. Experiența arată că presiunea se mărește de două ori. Vom scrie deci

$$V_1 = \frac{V_0}{2} \quad \text{și} \quad p_1 = 2p_0. \tag{78}$$

Din relațiile (78) rezultă

$$p_1 V_1 = p_0 V_0. \tag{79}$$

Micșorăm din nou volumul de două ori și făcînd produsul ca mai sus se obține

$$p_2 V_2 = p_1 V_1. \tag{80}$$

Și experiența poate continua. Din (79) și (80) rezultă

$$p_0 V_0 = p_1 V_1 = p_2 V_2 = \ldots = \text{const.}$$

sau, mai general,

$$pV = \text{const.} \tag{81}$$

Această relație exprimă *legea Boyle-Mariotte* și ea reprezintă *una dintre primele legi cantitative din istoria fizicii.* Legea Boyle-Mariotte se formulează astfel: *la temperatură constantă, produsul dintre presiunea și volumul aceleiași mase de gaz este constant.*

Robert *Boyle* (1627—1691), fizician, chimist și filozof englez, membru al Societății Regale din Londra. Boyle a fost unul dintre savanții secolului al XVII-lea care, ca și Democrit, admitea că materia se compune dintr-o mulțime de particule extrem de mici denumite corpusculi. (Dalton a înlăturat acest termen reintroducînd termenul de „atom".)

Lui Boyle i se datorește *prima definiție științifică a elementului chimic.* A avut contribuții de seamă în fundamentarea metodei analizei chimice cantitative. Independent de fizicianul francez E. Mariotte, a stabilit, în 1662, una din legile gazelor perfecte, denumită ulterior legea Boyle-Mariotte (Mariotte a descoperit-o în 1679).

Dacă reprezentăm grafic relația (81), într-un sistem de coordonate ortogonal bidimensional, luînd în ordonată presiunea și în abscisă volumul, se obține o hiperbolă echilaterală (fig. 63). Pentru aceeași masă de gaz la diferite temperaturi constante se obțin mai multe *izoterme*, ele unind stări de egală temperatură.



Comprimînd tot mai mult un gaz, moleculele se apropie și ele tot mai mult, interacționînd, ceea ce se răsfrînge asupra comportării gazului în ansamblu. În astfel de condiții, legea Boyle-Mariotte nu se verifică; ea se verifică numai atunci cînd interacțiunile dintre molecule sînt neglijabil de mici. Acesta este și motivul pentru care legea Boyle-Mariotte este o lege a gazelor perfecte. Pentru gaze reale, expresia matematică a acestei legi are o cu totul altă formă și este cunoscută sub denumirea de *ecuația Van der Waals.* Legea Boyle-Mariotte se poate aplica gazelor reale numai dacă acestea se află la temperaturi mari și presiune mică. Pentru gaze perfecte este, însă, valabilă fără restricții.

b) *Transformarea izocoră (legea lui Charles), $V = const.$* Un balon de sticlă cu gîtul lung, îndoit de două ori la 90°, este pus în legătură cu un furtun de cauciuc și un tub de sticlă, partea $ABC$ a instalației formînd un manometru (fig. 64). În interiorul balonului există un kilomol dintr-un gaz, iar în manometru — mercur. În momentul inițial volumul și presiunea gazului sînt respectiv $V_0$ și $p_0$, nivelul mercurului în ambele ramuri ale manometrului fiind pe linia $aa'$, iar temperatura gazului $T_0$. Introducînd balonul într-un vas cu apă caldă la temperatura $T$, gazul se va dilata apăsînd asupra mercurului, care va urca în ramura din dreapta și la un moment dat va rămîne staționar. Pentru

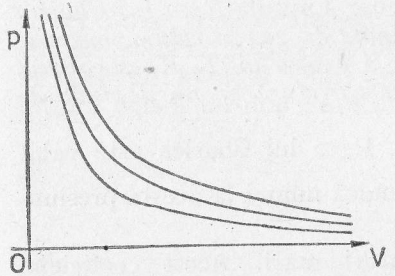



Fig. 63. Graficul legii Boyle-Mariotte în sistemul de coordonate Clapeyron.

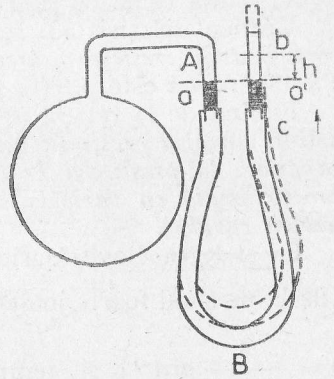



Fig. 64. Schema experienței lui Charles.

a avea volumul inițial, deoarece $V_0$ trebuie să rămînă constant, ridicăm ramura dreaptă a manometrului pînă cînd nivelul mercurului în ramura stîngă ajunge la cel inițial, adică la reperul *a*. În ramura dreaptă nivelul mercurului va fi în dreptul diviziunii *b* și deci denivelarea va fi egală cu *h* și ea determină presiunea suplimentară a gazului. Notăm presiunea și temperatura gazului din balon cu $p = p_0 + h$ și respectiv $T$. După mai multe experiențe de acest fel se ajunge la concluzia că între presiune și temperatură există relația

$$\frac{p}{p_0} = \frac{T}{T_0} \tag{82}$$

sau

$$p = p_0(1 + \beta t^\circ), \tag{83}$$

unde $T_0 = 273{,}15$ K, $T = T_0 + t^\circ$C și $\beta = \frac{1}{273{,}15}$ grd$^{-1}$.

Relația (82) se mai scrie sub forma

$$\frac{p - p_0}{p_0} = \frac{1}{T_0}(T - T_0). \tag{84}$$

Relația scrisă sub forma (82), (83) sau (84) exprimă legea lui Charles[1] și ea reprezintă grafic, în sistemul de coordonate ($p$, $V$), o dreaptă paralelă cu ordonata ($V$ = const.) (fig. 65,a). Într-un sistem de coordonate ($p$, $T$) relația (83) reprezintă o dreaptă, a cărei prelungire trece prin origine, avînd panta egală cu $p_0/T_0$ (tg $\varphi = n = p_0/T_0$) (fig. 65,b).

Graficul relației (83) se vede pe fig. 65,c. $\beta$ se numește *coeficient de creștere a presiunii gazului la volum constant*. Panta dreptei este $p_0\beta$ (tg $\varphi = p_0\beta$).

Plecînd de la relația (84) vom formula *legea lui Charles* astfel: *variația presiunii unei mase de gaz la volum constant, raportată la presiunea pe care a avut-o la $T_0$ K este direct proporțională cu variația de temperatură și nu depinde de natura gazului.*

Ca și legea Boyle-Mariotte, legea lui Charles este valabilă la presiuni foarte joase (fiindcă numai la aceste presiuni $\beta = \frac{1}{273{,}15}$ grd$^{-1}$) și temperaturi mari. Acest coeficient

[1] Descoperită în anul 1787.



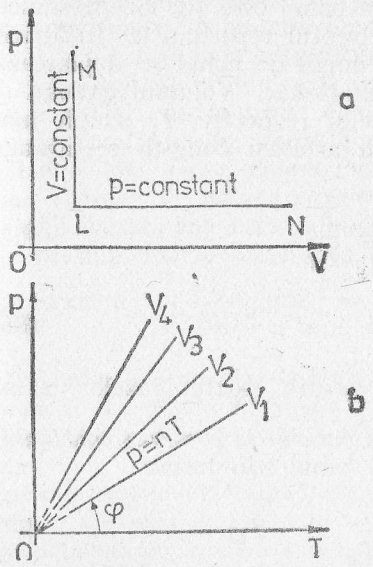



Fig. 65. a — Reprezentarea grafică a legii lui Charles în sistemul de coordonate Clapeyron.
b — Graficul legii lui Charles în coordonate $p$, $T$.
c — Reprezentarea grafică a legii lui Charles în coordonate $p$, $t$.

diferă de la gaz la gaz, diferența nefiind prea mare. Dar el depinde și de intervalul de temperatură, modificîndu-se odată cu schimbarea acestui interval, variațiile fiind însă mici.

Pe figura 65,b și c s-au reprezentat mai multe *izocore*, fiecare din ele corespunzînd la un anumit volum constant (izocora este curba care unește stări de același volum ale gazului). Se observă că toate izocorele, prelungite, se întîlnesc în punctul de coordonate (—1/β, 0), deci la temperatura de zero absolut.

c) *Transformarea izobară (legea Gay-Lussac)*, $p$ = const. Fie un balon de sticlă cu gîtul lung și îndoit la 90°. În balon se află un kilomol dintr-un gaz. În partea orizontală a gîtului există un dop de lichid colorat (fig. 66). La tempe-

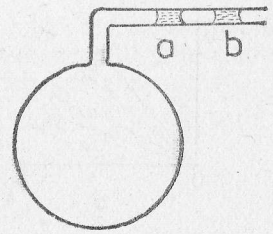



Fig. 66. Schema experienței lui Gay-Lussac.

ratura $T_0$, volumul gazului din balon este $V_0$, iar presiunea $p_0$, dopul de lichid fiind în dreptul reperului *a*. Încălzind ușor balonul vom observa că dopul de lichid se deplasează pînă la reperul *b*, rămînînd staționar. Volumul gazului și temperatura sînt $V = V_0 + v$ și respectiv $T$. După mai multe experiențe efectuate în aceleași condiții se ajunge la concluzia că

$$\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0} \tag{85}$$

sau

$$V = V_0(1 + \alpha t^\circ), \tag{86}$$

unde $\alpha = \frac{1}{273{,}15}\ \text{grd}^{-1} = \beta$, pentru toate gazele. $\alpha$ se numește *coeficient de dilatare a gazului la presiune constantă.*

Relația (85) se mai poate pune sub forma

$$\frac{V - V_0}{V_0} = \frac{1}{T_0}(T - T_0). \tag{87}$$

Grafic ecuația (85) reprezintă, în sistemul de coordonate ($p$, $V$), o dreaptă paralelă cu axa abscisei (fig. 65,a), în sistemul de coordonate ($V$, $t$) o dreaptă cu panta $V_0\alpha$ și ordonata la origine $V_0$ (fig. 67,a) iar în coordonate ($V$, $T$) se arată în figura 67,b. Curbele reprezentate în figura 67 se numesc *izobare* și ele unesc stări de aceeași presiune. Fiecare izobară corespunde la o anumită presiune constantă

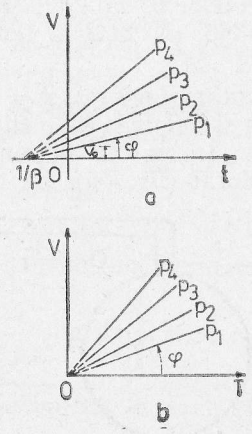



Fig. 67. Variația volumului gazului în funcție de temperatură, în coordonate $V$, $t$ și $V$, $T$ (în figura 65, a graficul acestei legi în sistemul de coordonate Clapeyron).



a gazului. Toate izobarele prelungite se întîlnesc, la temperaturi joase, în punctul de coordonate $(-1/\beta, 0)$. Relațiile (85), (86) sau (87) reprezintă *expresia matematică a legii Gay-Lussac.* Referindu-ne la relația (87) vom formula această lege astfel: *la presiune constantă, pentru aceeași masă de gaz, raportul dintre variația de volum și volumul inițial al gazului este direct proporțional cu variația temperaturii și nu depinde de natura gazului.*

Și această lege este valabilă pentru gaze reale, dar numai la presiuni foarte joase și la temperaturi mari. La astfel de presiuni $\alpha = \frac{1}{273{,}15}\ \text{grd}^{-1} = \beta$.

Louis Joseph *Gay-Lussac* (1778—1850), fizician și chimist francez. S-a născut în familia unui magistrat. Lussac se numea o bucată de pămînt pe care o avea tatăl său. Pentru a se distinge de ceilalți membri ai familiei, la numele său a fost adăugat denumirea pămîntului amintit. De la vîrsta de 16 ani a început să învețe singur matematica, iar la 19 ani a intrat la Politehnică, unde în anul 1800 a obținut titlul de inginer de poduri. Dar nu a profesat în acest domeniu. A preferat să intre în laboratorul condus de Berthollet. Legea care-i poartă numele, descoperită în anul 1802, a fost prima sa lucrare. A lucrat și în domeniul magnetismului. Împreună cu Biot s-a ridicat cu balonul pînă la altitudinea de 7 016 m, cea mai mare altitudine atinsă pînă atunci. Au stabilit cu prilejul acestei ascensiuni că forța magnetică a Pămîntului scade cu altitudinea. În anul 1816 a construit barometrul care-i poartă numele.

A lucrat în domeniul chimiei, descoperind legea volumelor constante la combinarea gazelor. Gay-Lussac, împreună cu Thénard, a descoperit clorul, borul (în anul 1808), acidul fluorhidric.

Spre sfîrșitul vieții sale, Gay-Lussac a ajuns una dintre cele mai însemnate personalități ale Academiei de Științe din Paris. Aceasta a determinat alegerea sa ca deputat și ca pair al Franței.

**Legea gazului perfect**

Vom considera un kilomol de gaz care în starea inițială are parametrii: $V_0$, $p_0$, $T_0$. Aplicăm acestui gaz o transformare izobară astfel încît parametrii vor deveni: $V_1$, $p_0$, $T$. Legea transformării o vom scrie, conform relației (85),

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{T}{T_0}, \tag{88}$$

Gazului aflat în această stare îi aplicăm acum o transformare izotermă, parametrii de stare devenind: $V$, $p$, $T$. Legea transformării, conform relației (81), o vom scrie

$$pV = p_0V_1. \tag{89}$$

Substituind $V_1$ din (88) în (89), se obține

$$pV = \frac{p_0V_0}{T_0}\,T = RT$$

deci

$$pV = RT \tag{90}$$

în care $R = \frac{p_0V_0}{T_0}$ este *constanta universală a gazelor perfecte*. În expresia ei, $p_0 = 101\,325$ N/m$^2$ reprezintă presiunea normală și corespunde la 760 mm Hg, $V_0$ este volumul ocupat de un kilomol de gaz la presiune normală și temperatura $T_0 = 273{,}15$ K și are valoarea 22,41 m$^3$ (și corespunde la 0° C); cu aceste valori se obține

$$R = 8{,}31 \cdot 10^3 \text{ J/kmol} \cdot \text{K}.$$

În practică se mai folosește valoarea

$$R = 82{,}1 \cdot \text{atm/kmol} \cdot \text{K}.$$

Relația (90) exprimă *legea gazului perfect pentru un kilomol*. Pentru $\nu$ kilomoli legea gazului perfect, denumită și *ecuația de stare a gazelor perfecte*, se scrie

$$pV = \nu RT \tag{91}$$

în care $\nu = m/M$, $m$ fiind masa gazului în kilograme, iar $M$ masa unui kilomol, de asemenea în kilograme. Legea gazului perfect mai este denumită legea *Mendeleev-Clapeyron*. E. Mach[1] susținea că ecuația (90) aparține lui Guillaume Amoutons (1663—1705).

Dacă ținem seama de faptul că $T$ K $= 273{,}15 + t$ °C, relația (90) devine

$$pV = p_0V_0(1 + \alpha t°). \tag{92}$$

[1] Vezi *Teoria cinetică moleculară a gazelor*, Editura științifică și enciclopedică, București, 1972, p. 40.



Facem mențiunea că, în condițiile în care temperatura este „departe" de punctul de lichefiere, iar presiunea nu este prea mare, deosebirea dintre gazele reale și gazele perfecte (ideale) este mică. Legile date aici sînt riguros valabile pentru gazele ideale, dar la temperaturi mari și presiuni foarte mici se pot aplica și gazelor reale.

Legea gazului perfect exprimată prin relația (90) sau (91) nu depinde de natura gazului. Într-adevăr, așa cum se observă, expresia matematică nu cuprinde vreo mărime fizică caracteristică pentru natura gazului; ea este deci o lege generală[1].

## LEGEA PRESIUNII OSMOTICE

Dacă într-un pahar cu apă introducem puțină sare de bucătărie și agităm apa, se observă că sarea „dispare" și, gustînd apa, constatăm că este sărată. Dacă în locul sării de bucătărie am introduce zahăr, am observa același lucru, numai că apa, în acest caz, va fi dulce. Se spune că sarea și zahărul s-au dizolvat în apă, iar amestecul obținut este o *soluție* de sare, respectiv de zahăr. Prin noțiunea de *soluție* vom înțelege *un sistem omogen solid, lichid sau gazos alcătuit din două sau mai multe substanțe*. În cazul exemplelor date vom spune că sarea, respectiv zahărul sînt solubile în apă. Apa este un *dizolvant* atît pentru sare, cît și pentru zahăr, iar sarea ori zahărul reprezintă substanța *dizolvată*.

Cîteva exemple de soluții: apa gazoasă (sifonul) este o soluție de acid carbonic în apă, fonta — o soluție de cărbune în fier, sticla colorată — o soluție de oxizi metalici diferiți, apa de colonie — o soluție de alcool, apă și esență aromată.

După starea de agregare soluțiile se împart în trei grupe: gazoase, lichide și solide.

Aici ne vom ocupa, succint, numai de *soluțiile lichide*. Acestea cuprind: a) soluții de gaze în lichide (de exemplu, apa gazoasă); b) soluții de lichid în lichid (de exemplu, apa de colonie sau lichidul din acumulatorii cu plumb, care este o soluție de acid sulfuric în apă distilată); c) soluții

[1] Din aceasta rezultă toate celelalte legi ale gazelor perfecte.

de solide în lichide (de exemplu, varul stins, care este o soluție de var în apă).

În studiul soluțiilor se folosesc o serie de termeni pe care trebuie să-i lămurim. În primul rînd, termenul de *solvent*[1] și *substanță dizolvată*. Prin noțiunea de *solvent* se înțelege *substanța care este în cantitate mai mare* (în exces) *într-o soluție*. *Substanța dizolvată* constituie cealaltă componentă a soluției și are solubilitate limitată. Cînd este vorba de soluții de lichide în lichide, noțiunile de „solvent" și „substanță dizolvată" sînt uneori nedefinite. Un exemplu: știm că alcoolul și apa se amestecă foarte bine în orice proporție; dacă soluția este diluată, cei doi termeni sînt definiți astfel: componentul în exces este numit solvent, iar cel de al doilea component este denumit substanță dizolvată.

Soluțiile sînt caracterizate prin termenul *concentrație*, înțelegînd prin aceasta cantitatea de substanță dizolvată într-un kilogram, litru sau $dm^3$ de dizolvant. În practică concentrația se exprimă în grame la 1 000 $cm^3$ de dizolvant. De exemplu, o soluție de sare cu apă de 3% înseamnă că 3 g sare sînt conținute în 1 000 $cm^3$ de apă.

Dizolvarea are loc datorită fenomenului de *difuziune*. Astfel, dacă într-un pahar cu apă introducem cîteva picături de cerneală, vom observa că în scurt timp apa devine colorată. Acest fenomen se numește *difuziune* și se datorește agitației termice. Aceasta înseamnă că creșterea temperaturii va intensifica difuziunea. Fenomenul de difuziune se produce nu numai între lichide, ci și între gaze, între solide etc. și constă în răspîndirea moleculelor unei substanțe printre moleculele altei substanțe.

Experiența arată că substanțele formate din moleculele mari difuzează mai încet decît substanțele alcătuite din molecule mai mici. Și tot experiența a evidențiat faptul că la soluțiile lichide și la gaze fenomenul de difuziune are loc după legi similare.

Am arătat mai sus cum decurge fenomenul de difuziune în cazul contactului direct dintre substanțe. Dar fenomenul de difuziune are loc și în cazul în care între substanțe am introduce membrane care nu sînt impermeabile, cum ar fi membrane animale, membrane gelatinoase, pergament, porțelan poros ș.a. Fenomenul de difuziune prin membrane permeabile a fost descoperit în mod accidental de către

[1] De la cuvîntul latin „solvere", care înseamnă *dizolvant*.



fizicianul francez J.A. Nollet (1700—1770). El a acoperit un vas plin cu alcool cu o bășică de bou, foarte bine întinsă și legată, apoi a introdus acest vas în altul cu apă. După cîteva ore a constatat că din interiorul primului vas a trecut alcool în apă (în cel de al doilea vas), iar bășica, plană inițial, a devenit convexă (adică membrana s-a curbat înspre exteriorul vasului cu alcool), ca urmare a pătrunderii apei în primul vas. Experiența arată că mai multă apă a intrat în primul vas, decît cantitatea de alcool care a ieșit din el.

Apoi a repetat experiența, însă modificată și anume: a introdus în primul vas apă și l-a acoperit cu bășica de bou, foarte bine legată și întinsă, după care l-a introdus în cel de-al doilea vas, unde se afla alcool. După cîteva ore a observat că meniscul era concav, adică invers decît în prima experiență, ceea ce însemna că în alcool a trecut o cantitate de apă mai mare decît cantitatea de alcool care a trecut în apă.

Astăzi putem reproduce experiența lui Nollet astfel: într-un vas cu apă *A* introducem un alt vas *B*, prevăzut cu un tub manometric, avînd fundul dintr-o membrană[1] semipermeabilă foarte bine întinsă. În acest vas introducem alcool pînă cînd nivelul ajunge în dreptul reperului *a* (fig. 68); vom observa că după un anumit interval de timp nivelul lichidului în tubul manometric se ridică pînă la reperul *b*, aflat la înălțimea *h* față de nivelul apei din primul vas (*A*). Și aici, în vasul cu alcool a trecut o cantitate de apă, determinînd creșterea de presiune. Dacă în locul alcoolului se folosește o soluție de zahăr (sirop) se va observa, de ase-

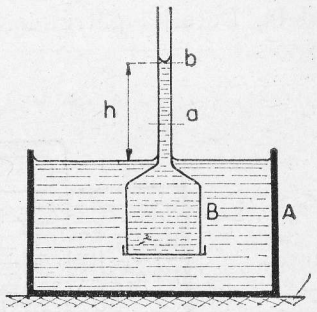



Fig. 68. Pentru punerea în evidență a presiunii osmotice.

[1] În cazul acesta, membrana trebuie să permită numai trecerea dizolvantului. De altfel în toate studiile privind fenomenul de osmoză se preferă astfel de membrane.

menea, o creștere a presiunii, ceea ce înseamnă că a trecut o cantitate destul de mare de apă, prin membrană, în soluția de zahăr. Dar și zahăr trece în apa din primul vas. Și în acest caz, cantitatea de apă care a trecut în soluția de zahăr este mai mare decît cantitatea de soluție care a trecut în apă.

Din aceste experiențe rezultă că există o trecere privilegiată, preferențială dacă vrem, și cu viteză mai mare a dizolvantului (apa) către soluție (apa cu zahăr sau apa cu alcool). Acest fenomen se numește *osmoză*, iar presiunea ce apare orientată înspre dizolvant, ca o consecință a fenomenului de osmoză, se numește *presiune osmotică*. Presiunea osmotică, care este de fapt o proprietate a soluțiilor diluate, se măsoară cu un aparat de tip special numit *osmometru* sau cu ajutorul *celulelor Pfeffer*. Așa cum se vede pe fig. 69, aparatul constă dintr-un vas poros $V_p$, care este prelucrat după o metodă indicată de către Traube în anul 1867: un vas de argilă poroasă, în care se toarnă pînă la umplere o soluție de ferocianură de potasiu $Fe(CN)_6K_4$, după care vasul respectiv se introduce într-un alt vas conținînd soluție de sulfat de cupru, $CuSO_4$. Datorită fenomenului de difuziune cele două soluții vin în contact. Ca urmare, se va precipita și fixa în porii vasului de argilă ferocianura de cupru sub forma unei membrane semipermeabile pentru soluții de zahăr. Vasului $V_p$ astfel prelucrat i se atașează un manometru $M$, după ce în prealabil a fost golit și umplut din nou, dar cu soluție diluată de zahăr. Vasul $V_p$, numit celulă, se introduce apoi într-un alt vas $V_a$ conținînd apa distilată. Datorită pătrunderii apei distilate în interiorul vasu-

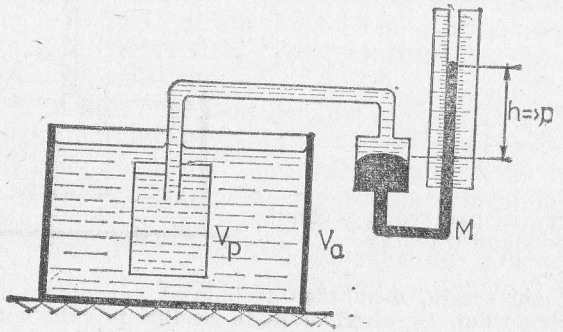



Fig. 69. Osmometru



lui $V_p$, în interiorul acestuia presiunea crește, valoarea ei putînd fi citită pe scara manometrului $M$. Această presiune este dată de coloana de mercur cuprinsă între cele două nivele ale mercurului în ramurile manometrului. Deci presiunea osmotică este citită pe scara manometrului, care este etalonată în unități de presiune. Cu ajutorul osmometrului se poate măsura presiunea osmotică și a altor soluții diluate.

Cînd apa trece din exterior în interiorul celulei fenomenul este numit *endosmoză*, iar dacă apa trece din interiorul celulei în exterior fenomenul se numește *exosmoză*. Osmometrul descris este numit *osmometru Dutrochet*.

Folosind un osmometru ca cel descris mai sus, Pfeffer[1] a ajuns, în anul 1877, la următoarele concluzii, denumite uneori *legile presiunii osmotice:*

1°. *Presiunea osmotică a soluțiilor diluate este proporțională cu concentrația molară a soluției, dacă temperatura se menține constantă.* Notînd presiunea osmotică cu $p_o$ și concentrația soluției cu $C$, prima concluzie a lui Pfeffer se exprimă matematic astfel

$$p_o = aC$$

sau

$$p_o = a\frac{m}{V}; \tag{93}$$

unde $a$ este un coeficient de proporționalitate, $C$ concentrația soluției, $m$ cantitatea de substanță dizolvată și $V$ volumul soluției.

2°. Din relația (93) rezultă expresia matematică a celei de a doua concluzii a lui Pfeffer, pentru presiunea osmotică

$$p_oV = am = \text{const.}$$

sau

$$p_oV = \text{const.}$$

și se formulează astfel: *la temperatură constantă, produsul dintre presiunea osmotică a unei soluții diluate și volumul ei este constant.* Desigur cititorul și-a dat seama că conținutul acestei concluzii este asemănător cu conținutul legii Boyle-Mariotte. Într-adevăr, acesta reprezintă legea Boyle-Mariotte transpusă pentru soluții.

[1] Pfeffer a lucrat cu soluții de zahăr diluate.

Pentru o soluție de zahăr, cu un anumit volum dat, Pfeffer a stabilit că

$$\frac{p_o}{p_o^0} = \frac{T}{T_0}; \qquad (94)$$

unde $p_o^0$ este presiunea osmotică la $T_0$, egală cu 0°C.

Relația (94) se verifică practic destul de bine (tabelul 2).

TABELUL 2

| Temperatura unei soluții de zahăr, (grade Kelvin) | Presiunea osmotică | |
|---|---|---|
| | măsurată (× $10^{-3}$ at) | calculată cu (94) (× $10^{-3}$ at) |
| 279,8 | 664 | 665 |
| 286,7 | 691 | 681 |
| 288,5 | 684 | 686 |
| 309,0 | 746 | 735 |

Presiunea osmotică în funcție de temperatură.

Concluziile de mai sus arată că între presiunea osmotică, pentru soluții diluate și presiunea gazelor este o perfectă identitate, ceea ce înseamnă că *un același număr de molecule exercită întotdeauna o aceeași presiune, fie că se află într-un gaz, fie că se află în soluție.*

3°. O altă concluzie stabilită experimental este următoarea: *presiunile osmotice sînt aceleași la toate soluțiile, independent de natura acestora, dacă temperaturile și concentrațiile molare ale soluțiilor sînt egale.*

Fizicianul olandez Van't Hoff a demonstrat teoretic, în anul 1887, identitatea dintre conținutul concluziilor date mai sus cu privire la presiunea osmotică pentru soluții diluate neelectrolitice și conținutul legilor gazelor perfecte. El a considerat că substanța dizolvată se află sub formă gazoasă în soluție, dar într-o stare condensată și că presiunea la care se găsește este cu atît mai mare cu cît este mai mare concentrația soluției. Aplicînd legea gazului perfect pentru $\nu$ kmoli (91), vom avea

$$p_o = \frac{m}{M} \cdot \frac{RT}{V} \quad \left(\text{deoarece } \nu = \frac{m}{M}\right)$$



sau

$$p_o = \frac{C}{M} RT. \qquad (95)$$

Această relație reprezintă *legea presiunii osmotice* sau *legea lui Van't Hoff*. Pentru o anumită substanță dizolvată dată, legea lui Van't Hoff arată că: a) presiunea osmotică, la temperatură constantă, este direct proporțională cu concentrația; b) presiunea osmotică este direct proporțională cu temperatura absolută, dacă concentrația este constantă; c) dacă $C$ și $T$ sînt constante, presiunea osmotică este invers proporțională cu masa molară $M$ (masa unui kmol) a substanței dizolvate.

Soluțiile care ascultă de legea Van't Hoff sînt izolante din punct de vedere electric, iar soluțiile care prezintă presiuni osmotice mai mari decît cele date prin relația (95), de exemplu soluțiile sărurilor anorganice, se numesc *electroliți*. Rezultă de aici că în procesul de dizolvare moleculele se disociază[1] și că părțile rezultate din disociere sînt *ioni* și nu *părți neutre*.

Presiunea osmotică este de ordinul zecimilor de atmosferă tehnică (v. tabelul 2).

Jacobus Hericus *Van't Hoff* (1852—1911), chimist olandez, profesor universitar la Amsterdam, Leipzig și Berlin. Studiind soluțiile a stabilit legea presiunii osmotice. A explicat izomeria optică a substanțelor organice, independent de Le Bel și a elaborat structura tetraedrică a atomului de carbon. Este unul dintre creatorii chimiei fizice moderne. Cele mai multe lucrări sînt din domeniul chimiei. În anul 1901 a primit premiul Nobel pentru chimie.

Între anii 1907 și 1912, Morse și Frazer au arătat că dacă în locul volumului soluției se ia volumul solventului (dizolvantului), atunci legea lui Van't Hoff dă rezultate mai bune.

Legea exprimată prin relația (95) cuprinde pe $R$, constanta universală a gazului perfect, deci se poate considera că este o lege generală pentru soluții.

[1] Crește numărul de particule din unitatea de volum, ceea ce atrage după sine creșterea presiunii osmotice.

Fie două soluții care vin în contact. Dacă presiunile lor osmotice sînt egale, soluțiile se numesc *izotonice*. Sîngele, limfa sînt soluții (medii) izotonice. Se poate demonstra că celulele animale nu pot trăi decît în medii izotonice. În cazul că soluțiile au presiuni osmotice diferite, soluția care are concentrație molară (presiune osmotică) mai mare absoarbe din dizolvantul celeilalte și este numită (prima) *hipertonică* față de cealaltă. Aceasta din urmă, însă, avînd concentrația molară mai mică decît prima se spune că este *hipotonică*, față de soluția *hipertonică*. Întotdeauna, cînd vin în contact două soluții, cu concentrații molare diferite, atunci [conform relației (95)] de la soluția hipotonică trece solvent către soluția hipertonică.

În viața zilnică se întîlnesc numeroase fenomene în care se manifestă presiunea osmotică, iar fenomenul de osmoză are o importanță capitală pentru viață, așa cum vom arăta mai jos.

Să dăm cîteva exemple. Dacă punem carne sau pește în sare, atunci ele pierd apa, deoarece concentrația molară în interiorul cărnii sau a peștelui este mai mică decît concentrația molară din exterior și deci soluția din interior este hipotonică. Ca urmare, apa trece din interior către exterior, deci în sarea în care le-am pus. Să punem acum carnea sau peștele în apă curată. Aceasta este o soluție hipotonică față de soluția din carne sau pește; concentrația molară a apei este mai mică și ca atare solventul, deci apa curată, intră în carne sau pește și acestea se umflă.

Se știe că celulele vii sînt alcătuite dintr-o membrană[1] în interiorul căreia se află citoplasma și nucleul. Membrana este semipermeabilă și datorită fenomenului de osmoză se produc schimburi de substanțe dintre celulă și mediul extracelular. Dar fenomenul de osmoză intervine întotdeauna în schimburile dintre organisme și mediul lor ambiant. El asigură presiunea mecanică din țesuturi și rezistența mecanică a lor. Aceasta are loc îndeosebi la plante. De asemenea, fenomenul de osmoză intervine în creșterea țesuturilor, în mișcările plantelor.

Fenomenul de osmoză este folosit la determinarea masei moleculare a substanței dizolvate, precum și a masei moleculare a substanțelor alcătuite din macromolecule.

[1] Cel mai important rol al membranelor biologice este acela de a echilibra presiunea osmotică a mediului intern cu presiunea osmotică a mediului extern.



În încheiere vom descrie o experiență, pe cît de interesantă, pe atît de frumoasă, cunoscută sub denumirea de *grădina minerală*. Iată cum se procedează. Într-un vas conținînd sticlă solubilă, care nu este altceva decît o soluție apoasă de silicat de sodiu, se introduc cîteva cristale de săruri minerale colorate. Se va observa că în jurul acestor cristale se formează membrane semipermeabile de silicați gelatinoși. Datorită fenomenului de osmoză apa trece prin aceste membrane în interiorul lor, deoarece apa este o soluție hipotonică față de soluția din interiorul membranei. Ca urmare, aceste membrane gelatinoase se umflă, crescînd rapid în toate direcțiile și în foarte scurt timp apare în fața ochilor o adevărată grădină din „plante" și „flori" multicolore.

## LEGEA LUI PLANCK PENTRU RADIAȚIE

Se știe că energia radiației incidente pe suprafața unui corp este parțial reflectată, parțial transmisă și parțial absorbită. Dacă energia radiantă este absorbită în întregime de către un corp, se spune că corpul este *absolut negru*, iar dacă este integral reflectată se spune că corpul este *alb*. Dacă absorbția este parțială și selectivă corpul este *colorat*.

O suprafață înnegrită cu negru de fum absoarbe cel mult 97% din energia incidentă. Dacă radiația incidentă pătrunde într-o incintă prevăzută cu o deschidere mică, în așa fel încît, odată intrată, să sufere multe reflexii înainte de a părăsi incinta și presupunînd că la fiecare reflexie numai 5% din energia incidentă este reflectată, iar restul absorbită, după 5 reflexii energia radiației se reduce la 0,000031% din energia incidentă. De aceea, un asemenea dispozitiv se numește corp *absolut negru* sau *radiator integral*. În figura 70 se arată cum se poate realiza, practic, un corp negru. O sferă goală în care s-a practicat o deschidere cu un diametru de cca 1/10 din diametrul sferei. În interior sfera este vopsită în indiferent ce culoare. Mersul radiației incidente este arătat pe figură.

Știm foarte bine că în timpul zilei cînd privim de afară într-o cameră, prin ferestre (acestea fiind închise), vedem că e întuneric, cu toate că pereții sînt vopsiți într-o culoare

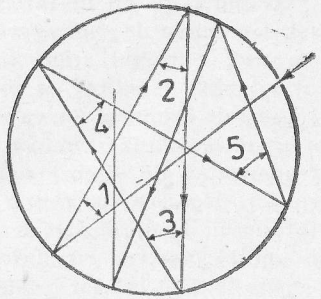



Fig. 70. Realizarea practică a corpului negru.

oarecare, chiar albă. Aşadar, camera pare neagră, deci se comportă ca un corp negru.

*Energia radiată de un corp în unitatea de timp, prin unitatea de suprafaţă, în toate direcţiile, pentru toate radiaţiile, de diferite frecvenţe* se numeşte *putere de emisie* şi se notează cu $E$. Puterea de emisie a unui corp depinde de temperatura sa şi de frecvenţă; de aceea, se notează cu $E_{\nu, T}$.

*Raportul dintre energia radiaţiei ce ajunge pe unitatea de suprafaţă a unui corp, în unitatea de timp, din toate direcţiile, cuprinzînd toate radiaţiile de diferite frecvenţe* se numeşte *putere de absorbţie* şi se notează cu $A$. Puterea de absorbţie depinde de temperatura corpului absorbant şi de frecvenţa radiaţiei absorbite şi se notează cu $A_{\nu, T}$.

Raportul dintre puterea de emisie $E_{\nu, T}$ a unui corp şi puterea lui de absorbţie $A_{\nu, T}$ este o funcţie numai de frecvenţă şi temperatură şi se notează cu $F(\nu, T)$. *Acest raport nu depinde de natura corpului.* Vom scrie deci

$$\frac{E_{\nu, T}}{A_{\nu, T}} = F(\nu, T). \tag{96}$$

$F(\nu, T)$ se numeşte *funcţie universală a lui Kirchhoff.*

Să considerăm un corp absolut negru, izolat termic într-o incintă absolut neagră, din care s-a evacuat aerul. Corpul este încălzit continuu, incinta este răcită continuu, astfel ca temperatura corpului să se menţină, cu toată radiaţia, la o valoare constantă $T$, iar temperatura incintei să se menţină, cu toată absorbţia, la o valoare constantă $T_0$. Pentru a simplifica expunerea vom considera $T_0 = 0$. Deoarece temperatura corpului se menţine mai ridicată decît temperatura incintei, rezultă că energia radiată de



corp este mai mare decît aceea radiată de incintă. Corpul fiind absolut negru, relaţia (96), denumită şi *legea lui Kirchhoff*, se scrie

$$\frac{\varepsilon_{\nu, T}}{\alpha_{\nu, T}} = F(\nu, T) \tag{97}$$

şi cum $\alpha_{\nu, T} = 1$, (97) devine

$$\varepsilon_{\nu, T} = F(\nu, T).$$

Aşadar, funcţia universală a lui Kirchhoff este chiar *puterea de emisie* a corpului negru. Dacă introducem în incintă, în locul corpului absolut negru, un corp avînd o culoare[1] oarecare, puterea lui de emisie $e_1$ şi puterea lui de absorbţie $a_1$ sînt mai mici decît $\varepsilon_{\nu, T}$ respectiv $\alpha_{\nu, T}$; raportul lor va fi tot o funcţie de $\nu$ şi $T$, $\varphi_1(\nu, T)$. Pentru un alt corp colorat $e_2/a_2 = \varphi_2(\nu, T)$.

Kirchhoff a stabilit în 1859, pe cale teoretică, din considerente termodinamice, că $\varphi_1 = \varphi_2 = F(\nu, T)$ şi deci

$$\frac{e_1}{a_1} = \frac{e_2}{a_2}.$$

*Raportul dintre puterea de emisie şi puterea de absorbţie a unui corp oarecare nu depinde de natura corpului, ci este o funcţie universală de temperatură şi de frecvenţa emisă şi este egal cu puterea de emisie a corpului absolut negru.* Aceasta este formularea *legii lui Kirchhoff* şi, matematic, se mai scrie sub forma

$$\frac{e_{\nu, T}}{a_{\nu, T}} = F(\nu, T) = \varepsilon_{\nu, T}. \tag{98}$$

Studiul funcţiei dată prin relaţia (98) prezintă o mare importanţă teoretică şi practică. Deşi relaţia (98) poate fi demonstrată uşor, nu o vom face, ci ne vom limita la analizarea concluziilor care se impun şi care trebuie cunoscute.

Expresia (98) se mai scrie

$$e_{\nu, T} = a_{\nu, T} \cdot \varepsilon_{\nu, T}. \tag{99}$$

[1] Este vorba despre culoare aşa-zis „energetică," nu cromatică, adică nu corespunde unei anumite lungimi de undă.

Deoarece $a < 1$, rezultă că un corp absolut negru are o putere de radiație superioară oricărui alt corp. Expresia (99) nu poate lua decît valori finite. Dacă un corp oarecare emite o radiație de frecvență $e_{\nu_i, T} \neq 0$ și cum $\varepsilon_{\nu, T} > e_{\nu_i, T}$, rezultă $a_{\nu_i, T} \neq 0$,. De asemenea, $\varepsilon_{\nu_i, T} \neq \infty$, deoarece pentru o energie sub formă de căldură primită, finită, corpul negru nu poate avea o emisie infinită. Din cele de mai sus reiese că pentru orice valoare dată lui $\nu_i$, atît $e_{\nu_i, T}$ cît și $a_{\nu_i, T}$ au valori bine determinate.

Prin urmare: *orice corp absoarbe, la radiație termică pură, aceleași frecvențe pe care le radiază la aceeași temperatură* sau, altfel exprimat, *la aceeași temperatură compoziția spectrală a radiației termice emisă de un corp este aceeași cu aceea a radiației termice pe care o poate absorbi.* Această constatare este extrem de importantă în spectroscopie și aparține tot lui Kirchhoff.

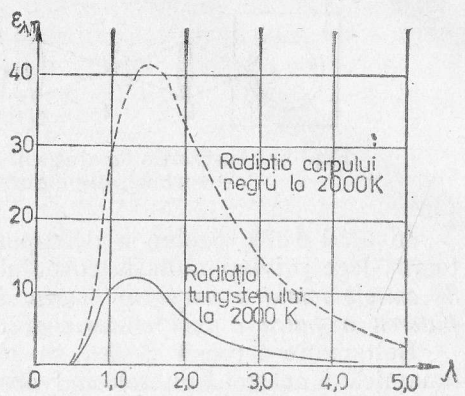
Puterea de emisie a unui corp se determină experimental destul de greu. În schimb, puterea lui de absorbție se determică foarte ușor. De aceea, pentru obținerea puterii de emisie se determină puterea de absorbție a corpului și funcția universală a lui Kirchhoff, aceasta din urmă cunoscînd puterea de emisie a corpului negru, $\varepsilon_{\nu, T}$ ($\varepsilon_{\lambda, T}$). De aici interesul sporit pentru determinarea funcției universale a lui Kirchhoff și pentru studiul radiației corpului negru (prescurtarea de la corp absolut negru).

*Emisia corpului absolut negru.* Simpla obsevare a unui metal încălzit ne arată influența creșterii temperaturii nu numai asupra intensității radiației, ci și asupra compoziției sale spectrale. La începutul încălzirii, o bucată de fier emite radiații invizibile, pe care le putem doar simți datorită sensibilității pielii. Pe măsură ce temperatura crește apar radiații vizibile. La început corpul este roșu, apoi se îngălbenește, pentru a ajunge la culoarea alb strălucitoare. O muncă deosebită, teoretică și experimentală, a fost depusă pentru găsirea legăturii între temperatura unui corp și puterea lui de emisie. În figurile 71 și 72 se arată rezultatele experimentale. În figura 71 se compară puterea de emisie a tungstenului, în funcție de lungimea de undă și la aceeași temperatură, cu aceea a corpului negru.

Încercările numeroase de a stabili o relație între puterea de emisie, lungimea de undă și temperatură pentru corpul negru — relație care să explice graficul din figura 72 și



Fig. 71. Variația emitanței spectrale în funcție de lungimea de undă, a tungstenului, comparată cu aceea a corpului absolut negru la aceeași temperatură.




deci să permită stabilirea formei funcției universale a lui Kirchhoff — au condus la rezultate parțiale, nesatisfăcătoare. Cu aceasta s-au ocupat fizicieni de seamă ca: Stefan, Boltzmann, Wien, Rayleigh, Jeans. Max Planck a fost singurul care a stabilit legea radiației corpului negru ce corespunde cu experiența pe tot domeniul de lungimi de undă.

Trasarea curbelor din figura 72 s-a făcut cu ajutorul unei instalații ca aceea din figura 73. Aici $V$ reprezintă incinta care servește drept corp negru, $C$ un cuptor în care este introdusă incinta și a cărui temperatură ia diverse valori, $L$ o lentilă convergentă, $f$ fanta unui spectrograf cu rețea, $C_1$ colimatorul spectrografului, $R$ o rețea de difracție, $Ob$ obiectivul spectrografului în al cărui plan focal se formează spectrul, iar $T$ un termoelement sau bolometru, ca receptor de energie.

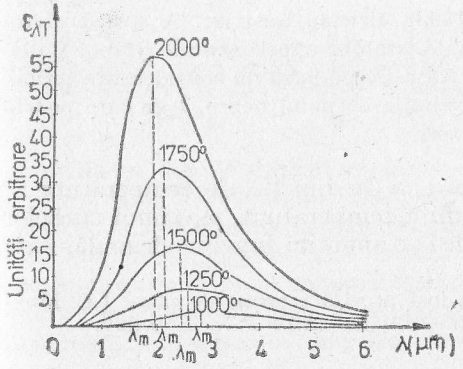



Fig. 72. Variația emitanței spectrale în funcție de lungimea de undă a corpului absolut negru pentru diferite temperaturi.

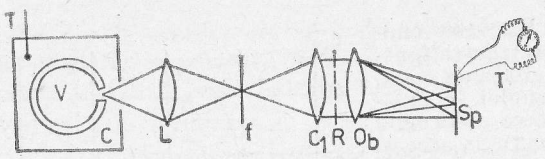



Fig. 73. Instalația cu ajutorul căreia s-au trasat curbele din figura 72.

În anul 1879, Stefan a descoperit experimental următoarea lege privind radiația corpului absolut negru: *puterea de emisie totală a corpului negru* $\varepsilon_T$ *este proporțională cu puterea a patra a temperaturii absolute.*

Boltzmann a reușit să dea, în 1884, o justificare termodinamică a acestei legi, folosind observația că orice radiație exercită o presiune[1] asupra corpurilor iradiate. Legea lui Stefan nu este valabilă decît pentru corpul absolut negru. Ea are următoarea formă

$$\varepsilon_T = \sigma T^4$$

și este numită *legea Stefan-Boltzmann*. În această expresie $\sigma$ este o constantă egală cu $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/m$^2 \cdot$ K$^4$, numită *constanta Stefan-Boltzmann*.

Pentru corpuri care nu sînt negre s-a reușit să se stabilească o relație de forma

$$E_T = k\sigma T^4.$$

Aici $k$ este un factor empiric, mai mic decît unitatea. Acest factor are valori caracteristice fiecărui material, deoarece valoarea lui depinde de natura corpului, de starea suprafeței acestuia, de temperatură ș.a.

Josef *Stefan* (1835—1893), fizician austriac. A fost profesor la Universitatea din Viena. A stabilit experimental, și apoi Boltzmann (1879) a demonstrat teoretic pe bază de considerente termodinamice, o lege privind radiația corpului negru, lege care poartă numele celor doi cercetători.

Analizînd variația lui $\varepsilon_{\lambda, T}$ în funcție de temperatura $T$ se observă că, la o anumită temperatură, maximul curbelor din figura 72 corespunde la o anumită lungime de undă, care

[1] Presiunea radiației a fost prezisă teoretic de către J.C. Maxwell și descoperită experimental de către P.N. Lebedev.



este cu atît mai mică cu cît temperatura este mai ridicată. Wien a arătat, în 1893, că între poziția maximelor și temperatură există următoarea relație

$$\lambda_M T = b, \qquad (100)$$

unde $\lambda_M$ reprezintă lungimea de undă a radiației emise la temperatura $T$ și corespunde maximului curbelor, iar $b$ o constantă cu valoarea $0{,}28978 \cdot 10^{-2}$ m $\cdot$ K, numită *constanta lui Wien*. Din (100) se vede că pe măsură ce $T$ crește, $\lambda_M$ scade. Așadar, această relație arată că poziția maximelor curbelor se „deplasează" înspre lungimi de undă mici atunci cînd temperatura crește. De aceea, relația (100) a fost numită *legea deplasării a lui Wien*.

Pentru puterea de emisie a corpului negru, deci pentru funcția universală a lui Kirchhoff, Wien a dat următoarea formulă

$$\varepsilon_{\lambda, T} = C_1 \lambda^{-5} (\exp C_2/\lambda T)^{-1}$$

cunoscută sub denumirea de *legea radiației a lui Wien*. $C_1$ și $C_2$ sînt constante. Această lege se verifică experimental numai pentru lungimi de undă mici (vezi curba din fig. 74). De aceea, prezintă interes numai din punct de vedere istoric, ca și legea Rayleigh-Jeans.

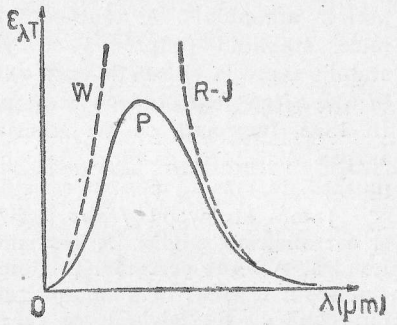



Fig. 74. Variația lui $\varepsilon_{\lambda, T}$ în funcție de $\lambda$ după legea lui Planck, Wien și Rayleigh-Jeans.

Wilhelm Carl Werner *Wien* (1864—1928), fizician german. A primit premiul Nobel în anul 1911, pentru lucrarea „Legile radiației termice". A fost profesor la Universitatea din Würzburg și la Universitatea din München. Wien a adus contribuții importante în domeniul termodinamicii radiației, stabilind trei legi care îi poartă numele, două din ele fiind date mai sus. Wien a studiat (1898) devierea razelor canal în cîmp electric și apoi în cîmp magnetic.

Rayleigh și Jeans au dat o lege care este în concordanță cu experiența numai pentru lungimi de undă mari (vezi fig. 74) și are forma

$$\varepsilon_{\lambda,\,T} = 2\pi C \lambda^{-4} k T$$

în care $C$ este o constantă, iar $k$ constanta lui Boltzmann.

Așadar, legea Rayleigh-Jeans este în contradicție cu experiența pentru lungimi de undă mici, deoarece ea arată că cea mai mare parte a energiei revine regiunii spectrale ce corespunde la lungimi de undă mici și temperaturi înalte; această situație a fost numită *„catastrofa ultravioletă"* (P. S. Ehrenfest).

Toate aceste legi aveau la bază fizica clasică și, așa cum s-a văzut, ele au explicat numai parțial dependența puterii de emisie a corpului negru de lungimea de undă pentru diferite temperaturi. Aceasta l-a făcut pe H. Lorentz să spună: „Ecuațiile fizicii clasice s-au dovedit incapabile să explice de ce o sobă stinsă nu emite raze galbene pe lîngă cele cu lungimi de undă mai mari".

John William Strutt *Rayleigh* (1842—1919), fizician englez. A fost profesor la Universitatea din Cambridge și membru al Societății Regale din Londra. În 1904 a primit premiul Nobel pentru fizică pentru lucrarea „Studii asupra densității gazelor și descoperirea argonului". A avut contribuții în domeniul radiației termice, stabilind (împreună cu Jeans) legea Rayleigh-Jeans. A stabilit expresia vitezei de grup a luminii. A studiat difuzia luminii în atmosferă, explicînd cu acest prilej culoarea albastră a cerului. În 1895, împreună cu W. Ramsay, a făcut determinări precise asupra densității gazelor, descoperind argonul. A dat definiția unității de măsură pentru rezistența electrică, ohmul.

James Hopwood *Jeans* (1877—1946), matematician, fizician și astrofizician englez. A fost membru al Societății Regale din Londra. A avut cercetări în domeniul fizicii teoretice, al teoriei cinetice a gazelor, în domeniul radiației corpului negru, stabilind, împreună cu Rayleigh, legea care le poartă numele.

Jeans are cercetări în domeniul dinamicii stelare și în domeniul echilibrului corpurilor lichide în rotație. Tot în astronomie, el este autorul unei ipoteze cosmogonice.

*Legea radiației a lui Planck.* În anul 1900, Max Planck a reușit să stabilească o relație care redă perfect distribuția energiei în spectrul corpului negru, relație care conține drept cazuri particulare toate legile arătate mai sus.



În primul rînd, Planck a arătat că, independent de modul cum este dedusă, formula radiației corpului negru trebuie să aibă aceeași formă cu cea dată de Rayleigh-Jeans, atît timp cît deducerea ei se bazează pe principiile fizicii statistice clasice. Corespondența acestei formule cu experiența, pentru toate frecvențele, nu poate fi obținută pe această cale. Corespondența se realizează numai în domeniul lungimilor de undă mari. În domeniul vizibil și ultraviolet, diferențele între teorie și experiență sînt extrem de mari.

În al doilea rînd, Planck și-a bazat formula pe o ipoteză care la acea vreme (anul 1900) era, pe bună dreptate, revoluționară. El considera că energia radiată de un corp nu se bucură de proprietatea continuității. În fizica clasică, energia unui oscilator de o anumită frecvență este direct proporțională cu pătratul amplitudinii și, deci, un astfel de oscilator poate înmagazina orice energie. Așa fiind, un oscilator poate emite orice cantitate de energie în fiecare unitate de timp.

După Planck, însă, un oscilator armonic emițător nu poate înmagazina orice cantitate de energie, în mod continuu, ci o cantitate care să fie un multiplu întreg de cantități elementare $h\nu$. Înseamnă că și radiația oscilatorului este emisă sub formă de cantități discrete de energie $h\nu$, deci energia este emisă în mod discontinuu.

Pînă în anul 1900 fusese acceptată discontinuitatea la substanță, acum însă experiența cerea extinderea ei și la radiație. Planck considera centrele materiale emițătoare (atomii sau moleculele din corpul negru) drept oscilatori armonici liniari, avînd sarcină electrică cu ajutorul căreia fac schimb de energie cu cîmpul electromagnetic. Acești oscilatori armonici, după ipoteza lui Planck, se pot găsi numai în anumite stări în care energia este un multiplu întreg al unei anumite cantități de energie, $\varepsilon = h\nu$ și anume

$$\varepsilon,\ 2\varepsilon,\ 3\varepsilon,\ 4\varepsilon,\ \ldots,\ n\varepsilon.$$

Prin emisie sau absorbție, oscilatorii trec dintr-una din aceste stări în alta, prin salturi, evitînd stările intermediare. Așadar, emisia și absorbția de energie se fac în cantități

care variază discontinuu, proporțional cu o cantitate bine determinată — *energia minimă, pe care o emite sau absoarbe un atom pentru o anumită frecvență de radiație.* Planck a numit această „porție" de energie — *cuantă de energie.* Nu toate cuantele de energie au aceeași valoare. Valorile lor sînt proporționale cu frecvența, factorul de proporționalitate fiind o constantă, notată cu $h$, numită *constanta lui Planck*

$$\varepsilon = h\nu$$

Dimensiunile constantei lui Planck rezultă din formula energiei unei cuante. Produsul dintre energie și timp a fost numit de Planck *acțiune.* De aceea, $h$ se mai numește *cuantă de acțiune.* Valoarea cuantei de acțiune a fost determinată experimental și teoretic și este $h = (6{,}62517 \pm 0{,}00023) \cdot 10^{-34}$ J · s.

Pe baza acestor ipoteze, *legea radiației* dată de Planck, în care în locul unei energii egal distribuite după gradele de libertate, așa cum consideră fizica statistică clasică, el introduce energia unui oscilator liniar distribuită discontinuu, este de forma

$$\varepsilon_{\lambda,\,T} = C_1\lambda^{-5}\,(\exp\, C_2/\lambda T - 1)^{-1} \qquad (101)$$

și a fost comunicată, în ziua de 19 octombrie 1900, Societății de Fizică din Berlin. În forma sa inițială reprezenta o relație empirică interesantă și importantă, nu o teorie. Ulterior, formula lui Planck (101) a primit numele de *legea radiației corpului negru a lui Planck* sau mai pe scurt, *legea radiației a lui Planck.* Constantele din această lege au valorile $C_1 = 2hc^2 = 1{,}191 \cdot 10^{-16}$ W · m² și $C_2 = hc/k = 1{,}434 \cdot 10^{-2}$ m · K; $c$ este viteza luminii în vid și, așa cum știm, este o constantă universală, iar $h$ este de asemenea o constantă universală. Așadar legea radiației a lui Planck se poate considera că este o lege generală.

În figura 74 se vede graficul expresiei matematice a legii lui Planck (curba notată cu $P$, de la numele lui Planck). Din formula lui Planck pot fi deduse toate celelalte legi studiate mai înainte.



Rezumînd, cele două ipoteze emise de către Planck sînt:

1) Orice oscilator are *numai* energia[1] dată de relația

$$W = nh\nu \qquad (102)$$

unde $n$ este un număr care poate lua valori întregi, denumit astăzi *număr cuantic.* Relația (102) ne spune că energia oscilatorului este *cuantificată.* Ulterior s-a stabilit formula corectă a energiei

$$W = \left(n + \frac{1}{2}\right) h\nu. \qquad (103)$$

Chiar dacă relația (102) diferă de (103), concluziile lui Planck nu se schimbă cu nimic.

2) Orice oscilator armonic *emite* radiații *numai* discontinuu, în „salturi" sau, altfel spus, în *cuante* și numai atunci cînd oscilatorul trece de la o stare cuantificată de energie la altă stare, tot cuantificată. La o variație a lui $n$ cu o unitate corespunde o cantitate de energie radiată egală cu $h\nu$.

Dacă oscilatorul rămîne numai în una dintre stările cuantice, el nu emite energie, dar nici nu absoarbe. Se spune că oscilatorul se găsește în *stare staționară.*

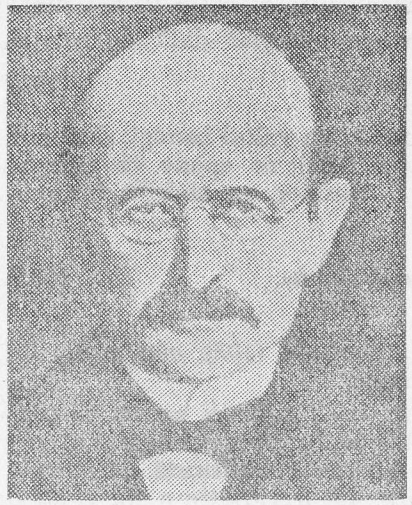
La început Planck însuși considera aceste ipoteze ca niște speculații matematice: „Încercările mele zadarnice de a interpreta clasic cuanta elementară de acțiune au continuat ani îndelungați, care mi-au cerut un mare efort", spunea Planck.

Așadar, fizica clasică a fost scoasă din impasul în care se afla în anul 1900, de către Planck, prin ipoteza cuantelor de radiație. După Planck, energia radiației este emisă de oscilatorii armonici liniari care se află în corpul negru, acești oscilatori putînd fi atomii sau moleculele corpului. Emisia se face în „porții", sub forma de cuante de energie, deci discontinuu, nu continuu cum concepea fizica clasică.

Max *Planck*, fizician german; s-a născut în anul 1858 și a încetat din viață la vîrsta de 89 de ani.

Planck a fost profesor la Universitatea din Kiel și la Universitatea din Berlin și membru al Academiei de Științe din Berlin.

[1] Deci nu orice energie.



**Max Planck**

Cînd s-a înființat „Kaiser Wilhelm Institut" din Berlin, Planck s-a ocupat de aducerea lui A. Einstein în cadrul conducerii Institutului. Institutul trebuia să cuprindă eminenți oameni de știință, care să fie scutiți de orice sarcini didactice, avînd deplina libertate să cerceteze tot ce doreau și punîndu-li-se la dispoziție aparatura științifică cea mai modernă. Ajutat de Nernst, Planck a reușit să aducă în acest institut cele mai mari somități științifice ale Germaniei din acea vreme.

Planck a reușit să stabilească, în anul 1900, legea de distribuție a energiei în spectrul corpului negru, lege care îi poartă numele. Pentru aceasta a trebuit să introducă discontinuitatea energiei, formulînd ipoteza cuantelor de radiație, ipoteză transformată în 1905, de către A. Einstein, în teorie.

Ipoteza cuantelor de radiație a însemnat o revoluție în fizică.

Se spune că Planck a avut ideea genială a discontinuității radiațiilor în momentul cînd Rayleigh și Jeans, pe de o parte și Wien, pe de altă parte, își prezentau formulele lor și tot atunci a intuit, analizînd rezultatele fizicienilor de mai sus, forma funcției universale a lui Kirchhoff, de fapt legea care-i poartă azi numele.

Planck a precizat și a generalizat noțiunea de entropie și a arătat semnificația principiului al doilea al termodinamicii pentru procese ireversibile. Planck a adus contribuții și în teoria relativității.



Din punct de vedere filozofic s-a situat pe pozițiile filozofice materialiste. El afirma: „... mărturisesc că nu am înțeles bine știința fizicii pînă nu am studiat materialismul dialectic".

În anul 1918 a primit premiul Nobel pentru fizică pentru lucrarea „Teoria cuantică a radiației".

... Pe cînd era încă adolescent, Planck a cerut sfatul fizicianului Joly asupra viitoarei sale cariere. El opta pentru fizică, dar Joly i-a spus că în fizică s-a făcut totul, deci acesta este un capitol închis și, prin urmare, e bine să se orienteze către altă meserie, de preot de exemplu. Planck nu i-a urmat sfatul și bine a făcut!

Ipoteza cuantelor a avut un rol extrem de important în dezvoltarea fizicii moderne. Aplicațiile practice ale legii lui Planck se întîlnesc oriunde există o sursă de radiație. Iată cîteva exemple:

*Surse luminoase termice.* Acestea folosesc aproape exclusiv emisia de radiații a corpurilor solide. Ele funcționează fie datorită unor fenomene chimice (flacără), fie pe cale electrică. Pentru a deplasa partea principală a emisiei în domeniul vizibil există două posibilități: ridicarea temperaturii sau emisia selectivă. Puterea de absorbție a corpurilor incandescente trebuie să se afle în domeniul vizibil, cît mai aproape de aceea a corpului negru, iar în celelalte domenii, în special în infraroșu, ea trebuie să fie cît mai redusă.

Compoziția spectrală a luminii obținută prin combustie se datorește existenței în flacără a funinginei în urma unei arderi incomplete. Funinginea este alcătuită din praf foarte fin de carbon. Adus la incandescență în flacăra becului respectiv, acest praf de carbon emite radiații cu o compoziție spectrală apropiată de aceea a corpului negru.

Mărirea puterii de emisie[1] în domeniul vizibil se poate face, la sursele luminoase cu flacără, introducînd materiale cu emisie selectivă. Astfel, la sfîrșitul secolului trecut, Auer a inventat o sită impregnantă cu oxizi de toriu și ceriu (1%), care modifică sensibil, în bine, compoziția spectrală a luminii emise.

[1] Care se mai numește *emisivitate*.

Pentru iluminatul electric se folosesc becurile cu incandescență la care filamentul este făcut dintr-un metal rezistent la temperaturi ridicate—wolframul. Cu toate că temperatura de topire a wolframului este de 3 700 K, temperatura filamentului nu trebuie să depășească timp prea îndelungat 2 700 K din cauza evaporării filamentului. Filamentul, dublu spiralizat (pentru a micșora pierderile de căldură), emite lumină a cărei compoziție spectrală se apropie foarte mult, în domeniul vizibil, de aceea a corpului absolut negru. Pentru alte scopuri, de pildă pentru obținerea de radiații monocromatice, temperatura de lucru ajunge la 3 400 K. Durata de viață a becului scade, însă, de la circa 1 000 ore la 1—2 ore. În interior becurile au un gaz „inert" pentru a împiedica evaporarea filamentului și transmiterea căldurii în exteriorul lor.

*Măsurarea optică a temperaturilor.* În măsurarea temperaturilor mai mari de 600°C, radiația termică și legile ei își găsesc un domeniu de aplicație foarte util. Pentru temperaturi mai mari de 2 600°C, măsurarea optică a temperaturilor este singura metodă de care dispunem. Pentru măsurarea temperaturii se compară strălucirea de radiație a corpului cu temperatură necunoscută cu strălucirea de radiație a unui corp absolut negru. De obicei se variză temperatura corpului absolut negru pînă la o valoare — numită *temperatură de radiația a corpului* $T_r$ — la care strălucirea sa de radiație este egală cu strălucirea de radiație a corpului analizat. Ea este întotdeauna mai mică decît temperatura reală, deoarece puterea de absorbție a oricărui corp este mai mică decît a corpului negru. Pe acest prncipiu sînt construite *pirometrele optice.*

Există mai multe metode de determinare a temperaturilor unui corp cu ajutorul pirometrelor. Vom descrie aici două dintre acestea și anume: *metoda radiației* și *metoda strălucirii.*

a) *Pirometrul de radiație* constă dintr-un tub avînd la o extremitate o lentilă convergentă, iar la cealaltă extremitate sudura plină a unui termocuplu (fig. 75). *I* reprezintă corpul a cărui temperatură vrem să o măsurăm.



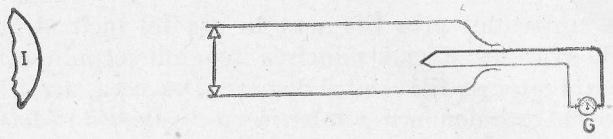



Fig. 75. Pirometrul de radiație.

Aparatul este etalonat cu ajutorul corpului negru la diferite temperaturi, galvanometrul indicînd astfel temperaturile reale pentru corpurile negre cercetate.

Temperatura corpurilor care nu sînt negre, măsurată cu ajutorul acestui pirometru, nu este temperatura reală a acestora. Această temperatură este egală cu temperatura corpului negru a cărui strălucire integrală este egală cu strălucirea integrală a corpului a cărui temperatură ne interesează. Temperatura măsurată cu acest pirometru este temperatura de radiație $T_r$. Folosind legea Stefan-Boltzmann, se obține temperatura reală $T$ a corpului.

b) Aparatul constă dintr-o lunetă, avînd în planul focal-obiect al obiectivului *Ob* filamentul unui bec cu incandescență (fig. 76). Becul este legat într-un circuit electric.

Pentru măsurare se îndreaptă obiectivul pirometrului spre corpul a cărui temperatură vrem să o determinăm. Cu ajutorul reostatului *R* din circuitul electric potrivim inten-

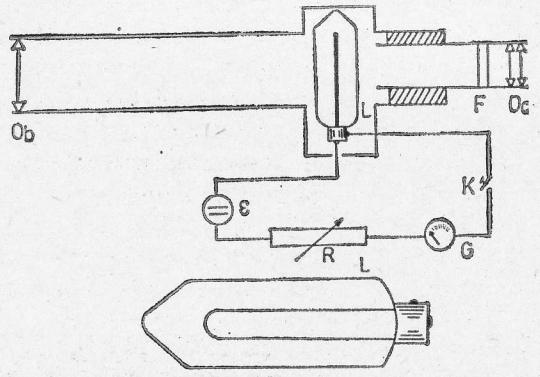



Fig. 76. Pirometrul optic cu dispariția filamentului.

sitatea curentului prin filament în așa fel încît strălucirea acestuia să fie egală cu strălucirea imaginii corpului cercetat. În această situație filamentul dispare. De aceea, acest instrument optic este denumit *pirometru cu dispariția filamentului* (Holborn și Kurlbaum).

Aparatul este etalonat în prealabil cu ajutorul corpului negru. Pentru corpuri care nu sînt negre se determină, cu acest instrument, *temperatura de strălucire* $T_s$. Aceasta reprezintă temperatura corpului negru care are, pentru lungimea de undă aleasă pentru determinări, aceeași strălucire ca și corpul studiat. Trecerea de la $T_s$ la temperatura reală se face cu ajutorul unei relații de transformare obținută din formula lui Planck.

# LEGI ALE CĂROR EXPRESII MATEMATICE CUPRIND CONSTANTE CARACTERISTICE MATERIALELOR

*„Îndrumarea spre înțelegerea corectă a fenomenelor electrice și magnetice o datorăm lui Michael Faraday".*

Max von Laue

## LEGEA LUI COULOMB

Experiența arată că starea de electrizare a corpurilor se menține un timp limitat, care este mai lung or mai scurt, în funcție de natura corpurilor. Cu alte cuvinte, corpurile electrizate pierd sarcina electrică, aflată în exces, mai devreme sau mai tîrziu (sarcina nu dispare, ci trece pe alte corpuri sau în mediul înconjurător) și deci starea de electrizare dispare. Trecerea de la starea de electrizare la starea neutră se numește *relaxare electrică*.

Se admite (și experiența confirmă) că

$$\frac{d\rho}{dt} = k\rho, \tag{104}$$

$\rho$ fiind densitatea volumică de sarcină electrică, dată de relația

$$\rho = \rho(x, y, z) = \lim_{V\Delta \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta V} = \frac{dq}{dV}.$$

Aici $\Delta V$ este un volum luat în jurul unui punct $M$ $(x, y, z)$, în care sarcina $\Delta q$ este în exces, iar $k = -1/\tau$; $\tau$ se numește *coeficient de relaxare*. Deci $\rho$ este densitatea volumică în punctul $M$, adică este funcție de coordonatele acestui punct. Ea se exprimă în $C/m^3$ sau $A \cdot s \cdot m^{-3}$.

Din (104), după separarea variabilelor și integrare avem

$$\ln \frac{\rho}{\rho_0} = kt$$

de unde

$$\rho = \rho_0 (\exp\, t/\tau)^{-1}, \tag{105}$$



unde $\rho$ este densitatea volumică de sarcină la momentul $t$, $\rho_0$ densitatea volumică de sarcină la $t = 0$.

Coeficientul de relaxare $\tau$ are dimensiunile unui timp și el depinde de natura și starea corpului și a mediului înconjurător.

Pentru $\tau = t$, din (105) rezultă

$$\rho = \frac{1}{e}\rho_0,$$

adică *coeficientul de relaxare reprezintă timpul după care densitatea volumică de sarcină devine de e ori mai mică decît densitatea volumică inițială.*

În figura 77 se dă graficul de variație a lui $\rho$ în funcție de timp pentru substanțe conductoare, semiconductoare și izolante.

În funcție de valorile coeficientului de relaxare se face o clasificare (neriguroasă)[1] a substanțelor. Astfel, dacă

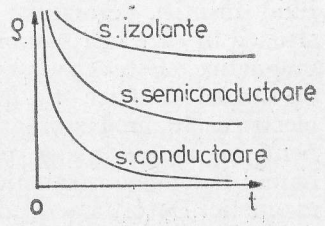



Fig. 77. Variația lui $\rho$ cu timpul.

coeficientul de relaxare pentru un corp este de ordinul minutelor sau orelor, corpul respectiv se numește *izolant* sau *dielectric* (piesele confecționate din substanțe izolante se numesc *izolatoare*). În cazul izolanților perfecți (ideali), coeficientul de relaxare este infinit de mare. Din categoria substanțelor izolante fac parte: chihlimbarul, ceara, parafina, sticla, ebonita[2], sulful, uleiurile, aerul uscat, pînza (de bumbac, mătase, in), masele ceramice, mica, șelacul, colofoniul, opalul, bachelita, pertinaxul, textolitul, polistirenul, teflonul ș.a.

Dacă coeficientul de relaxare pentru un corp este foarte mic, de exemplu de ordinul fracțiunilor de secundă, corpul

[1] Datorită metodei și modului de determinare a lui $\tau$.

[2] Ebonita este cauciuc natural (rășină) vulcanizat cu mult sulf (30%).

considerat se numește *conductor*. La conductoare perfecte (ideale) coeficientul de relaxare este nul, relaxarea producîndu-se instantaneu. Toate metalele sînt conductoare, de asemenea grafitul. Soluțiile de săruri, acizii, bazele topite și, în anumite condiții, gazele sînt de asemenea conductoare, dar nu fac parte din clasa metalelor. Prin ele, atunci cînd sînt supuse unei diferențe de potențial, trece curent în ambele sensuri (de exemplu, în soluțiile de electrolit) și deplasarea sarcinii electrice este însoțită de o deplasare de substanță. În fine, există o categorie de substanțe al căror coeficient de relaxare se situează între cel al conductoarelor și cel al izolanților: substanțele *semiconductoare*. La acestea coeficientul de relaxare este de ordinul secundelor. Dintre substanțele semiconductoare mai răspîndite citățm: seleniul, germaniul, siliciul, CaCl, AgBr ș.a. Ce fenomene fizice generează o asemenea comportare?

Se știe că electronii și protonii, care pot exista și în stare liberă, se află într-o continuă mișcare în substanțe, fiind însoțiți permanent de cîmp electromagnetic. Există situații în care într-o substanță nu se pot constata fenomene magnetice. Este cazul conductoarelor imobile și încărcate cu sarcini electrice. La acestea se constată numai fenomene electrice. În mod similar, în apropierea magneților permanenți și imobili nu se pot constata fenomene electrice, ci numai fenomene magnetice, adică numai existența cîmpului magnetic. Datorită acestui fapt, cîmpurile electric și magnetic pot fi studiate separat. Trebuie, totuși, să precizăm că: cîmpul electric nu există separat de cîmpul magnetic, ci numai împreună, ambele formînd cîmpul electromagnetic. În anumite condiții, însă, poate să predomine net fie cîmpul electric, fie cîmpul magnetic.

Mediul din jurul unui corp electrizat își schimbă unele din proprietățile sale. Se spune că în jurul corpurilor electrizate se creează un *cîmp electric*. Dar cîmpul electric poate fi generat și în vid nu numai în aer or în alt mediu material. Experiențele au condus la concluzia că, în mod convențional, cîmpul electric poate fi caracterizat prin *forța ponderomotoare*[1], care acționează asupra corpurilor încărcate electric și imobile introduse în cîmp.

[1] De la cuvîntul latin „pondos", care înseamnă *greutate*; ponderomotor — ceea ce pune în mișcare corpuri ponderabile.



Ținînd seama de cele de mai sus, cîmpul electric poate fi definit ca *unul din cele două aspecte ale cîmpului electromagnetic, totdeauna unic și care se manifestă prin forța ponderomotoare ce acționează asupra unui corp încărcat electric și imobil, introdus în cîmp*. Forța ponderomotoare se poate exprima matematic printr-o relație de forma

$$\vec{F} = q_0 \vec{E}, \qquad (106)$$

unde $q_0$ este sarcina electrică a corpului introdus în cîmpul electric, iar $\vec{E}$ este o mărime fizică vectorială ce caracterizează cîmpul electric în fiecare din punctele sale și se numește *intensitate a cîmpului electric* sau, simplu, *cîmp electric*[1]. Vom folosi această din urmă denumire.

Unitatea de măsură pentru intensitatea cîmpului electric este volt/metru (V/m) sau newton/coulomb (N/C). Cel mai des se folosește V/m.

Cea mai simplă formă de cîmp electric este *cîmpul electrostatic*, creat de corpuri imobile încărcate a căror sarcină electrică este în echilibru. Cîmpul electric care nu variază în timp este numit *cîmp electric staționar*. Cîmpul electrostatic este un caz particular al cîmpului electric staționar. Pentru vizualizarea distribuției cîmpului electric se folosește o metodă comodă și anume metoda liniilor de cîmp. Pentru a defini linia de cîmp electric, vom admite că am examinat cîmpul electric în întregime și că am determinat intensitatea cîmpului în fiecare punct. Liniile construite prin aceste puncte în așa fel încît tangenta geometrică în fiecare punct al lor să coincidă cu vectorul cîmp electric se numesc *linii de cîmp electric*. În figurile 78, a, b, c și d s-au reprezentat liniile de cîmp electric în diferite cazuri. Cînd se reprezintă în desen liniile de cîmp electric, acestea se prevăd cu săgeți care arată sensul vectorului cîmp electric.

În figurile 79, a și b se arată modul cum se construiesc liniile de cîmp. Ansamblul liniilor de cîmp electric reprezintă ceea ce se numește *spectru al liniilor de cîmp electric*.

Liniile de cîmp electric au sensul de la corpul încărcat pozitiv către corpul cu sarcină negativă sau către infinit. Între vectorul cîmp electric și liniile de cîmp există o legătură care se poate exprima astfel: direcția lui $\vec{E}$ în orice

[1] Modulul vectorului cîmp electric îl vom numi, în această lucrare, intensitatea cîmpului electric, pentru a evita o confuzie.

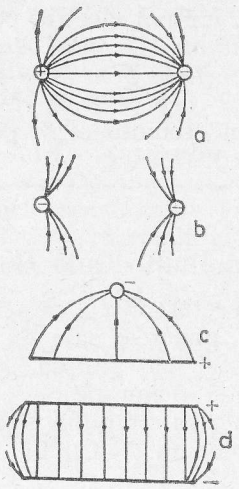



Fig. 78. Spectrul liniilor de cîmp electric.

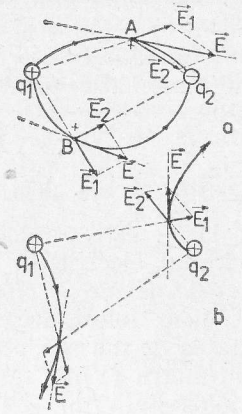



Fig. 79. Construcția liniilor de cîmp.

punct al liniei de cîmp este dată de tangenta geometrică în punctul respectiv, iar sensul lui $\vec{E}$ este acela al liniilor de cîmp; numărul de linii pe unitatea de suprafață transversală este proporțional cu $|\vec{E}|$, adică cu modulul vectorului electric. Aceasta înseamnă că $E$ este mare acolo unde liniile de cîmp sînt mai apropiate unele de altele și mai mic acolo unde liniile de cîmp sînt mai depărtate între ele. Dacă liniile de cîmp electric sînt paralele între ele și echidistante, cîmpul electric este *uniform*.

Fie o particulă[1] încărcată electric cu sarcina $+q$, aflată în vid (fig. 80). Cîmpul electric are în acest caz simetrie sferică, iar acțiunea cîmpului se transmite prin suprafețe sferice în centrul cărora se află particula cu sarcina electrică $+q$. Intensitatea cîmpului la o distanță $r$ de această particulă trebuie să fie invers proporțională cu aria $4\pi r^2$ a suprafeței sferice de rază $r$.

[1] Prin particulă vom înțelege aici un corp ale cărui dimensiuni liniare sînt neglijabile în comparație cu distanța la care se studiază valoarea cîmpului electric generat în jurul ei.



Dar intensitatea cîmpului electric este direct proporțională cu mărimea sarcinii care generează cîmpul. Vom scrie deci

$$E = k\frac{q}{4\pi r^2} \qquad (107)$$

unde $k = 1/\varepsilon_0$ este un factor de proporționalitate, iar $\varepsilon_0$ o mărime fizică ce caracterizează mediul, în cazul de față vidul, din punct de vedere electric și are valoarea

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \text{F/m}.$$

Vom scrie, deci, relația (107)

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}.$$

Deoarece $E$ reprezintă modulul vectorului $\vec{E}$, vom scrie

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\cdot\frac{\vec{r}}{r} \qquad (108)$$

unde $\vec{r}/r$ este un vector cu modulul egal cu unitatea și se numește *versor al direcției r*.

Pr n urmare, conform relației (107) $E$ este invers proporțional cu pătratul distanței de la particula încărcată electric, ce creează cîmpul, pînă la punctul în care se calculează $E$ și direct proporțional cu mărimea sarcinii electrice a particulei.

Pentru un mediu oarecare, omogen și izotrop, caracterizat prin permitivitatea absolută $\varepsilon$, relațiile (107) și (108) se scriu punînd $\varepsilon$ în locul lui $\varepsilon_0$.

Din relația (106) avem

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

Comparînd această relație cu (68), care exprimă intensitatea cîmpului gravitațional, constatăm o analogie. Lui $\vec{E}$ îi corespunde $\vec{H}$ și lui $q$ îi corespunde $m$. Atît $\vec{E}$, cît și

$\vec{H}$ se obține prin împărțirea unei forțe $\vec{F}$ la o mărime scalară caracteristică corpului de probă[1]: *sarcina electrică* respectiv *masa*. Prin urmare, definițiile lui $\vec{E}$ și $\vec{H}$ sînt foarte asemănătoare, exceptînd mărimea scalară.

Să presupunem acum că în punctul $M$ (fig. 80) așezăm o altă particulă cu sarcina $+q_0$ (corp de probă). Între aceste particule se va exercita o forță de respingere sub a

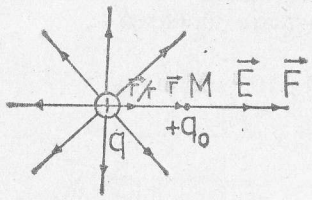



Fig. 80. Pentru reprezentarea lui $\vec{E}$ și $\vec{F}$.

cărei acțiune particula mobilă din $M$ se va mișca după direcția și sensul lui $\vec{r}/r$.

Interacțiunea dintre corpuri (particule) electrizate a fost cercetată de către Cavendish[2] și de către Coulomb. Amîndoi au făcut cercetări pentru a demonstra de ce și cum depinde forța de interacțiune dintre corpuri electrizate. Cel ce a reușit să stabilească experimental relația cantitativă ce exprimă legătura dintre forța de interacțiune și mărimea sarcinilor, precum și dintre forță și distanța pe care se deplasează corpurile încărcate datorită interacțiunii, a fost Coulomb.

El s-a condus după legea gravitației universale stabilită de către Newton, zicîndu-și că și în cazul corpurilor electrizate trebuie să existe o lege analoagă. Aparatul cu care Coulomb a stabilit legea care-i poartă numele a fost imaginat de el și este cunoscut sub denumirea de *balanța de torsiune a lui Coulomb* (fig. 81).

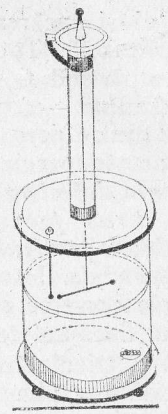
El a făcut experiența în două etape: mai întîi a stabilit că forța de interacțiune este direct proporțională cu pro-

[1] Reamintim că corpul de probă reprezintă un corp cu ajutorul căruia putem să punem în evidență existența cîmpului gravitațional, respectiv electric, în jurul unui alt corp.

[2] Cavendish a studiat pentru prima dată, experimental și teoretic, problema răspîndirii sarcinilor electrice pe suprafața corpurilor conductoare și, folosind analogia cu forța newtoniană a gravitației universale, a dedus teoretic legea interacțiunilor electrostatice dintre particule electrizate.



Fig. 81. Balanța lui Coulomb.



dusul dintre sarcinile cu care sînt încărcate corpurile, iar apoi că $F$ este invers proporțională cu pătratul distanței dintre centrele de simetrie ale corpurilor. Legea stabilită de Coulomb, lege care reprezintă o generalizare a datelor experimentale, a fost dată publicității în anul 1785 și expresia ei matematică este

$$\vec{F} = \frac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r} = \frac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \vec{r}. \qquad (109)$$

Dacă corpurile încărcate electric se află în alt mediu decît vidul, caracterizat prin $\varepsilon$, atunci în (109) se substituie $\varepsilon_0$ cu $\varepsilon$. Expresia (109) se obține din (106) și (108).

Facem precizarea că legea lui Coulomb este valabilă, de fapt, numai atunci cînd corpurile încărcate electric au dimensiuni liniare mici, neglijabile, în comparație cu distanța $r$. În aceste condiții, la distanța $r$ forța de interacțiune nu se modifică atunci cînd se micșorează dimensiunile corpurilor sau cînd se schimbă, în mod arbitrar, forma lor. Dacă am presupune, de exemplu, două stele încărcate electric, ele ar putea fi considerate particule, în sensul arătat mai sus — cu toate că dimensiunile lor liniare sînt foarte mari — deoarece distanța dintre ele este enormă. La astfel de distanțe forța de interacțiune nu este influențată de forma și dimensiunile stelelor. Dacă, însă, am considera două corpuri cît două mingi de tenis de masă, al căror diametru este de aproximativ 3 cm, la distanța de 20 cm

unul de altul și încărcate electric, legea lui Coulomb nu mai este aplicabilă. Totuși, forța de interacțiune se poate determina împărțind fiecare sferă în particule suficient de mici și calculînd — după legea lui Coulomb — forța de interacțiune dintre perechi de particule, iar apoi forța rezultantă. Cu aceste precizări, vom formula astfel legea lui Coulomb: *forța de interacțiune dintre două particule încărcate electric este direct proporțională cu produsul sarcinilor cu care sînt încărcate particulele și invers proporțională cu pătratul distanței dintre ele.* Dacă sarcinile particulelor au același semn (ambele pozitive sau ambele negative) forța este de respingere, iar dacă au semne contrare, forța este de atracție.

Fie două particule încărcate cu sarcinile $q$ și respectiv $q_0$, la o distanță $r$ una de alta, mai întîi în vid și apoi într-un mediu oarecare (sau invers); aplicînd legea lui Coulomb în ambele cazuri și făcînd raportul celor două expresii matematice se obține

$$\frac{F_0}{F} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon. \qquad (110)$$

Din relația (110) se vede că $F_0 = \varepsilon_r F$ (unde $\varepsilon_r \geqslant 1$), cu alte cuvinte că forța de interacțiune în vid este de $\varepsilon_r$ ori mai mare decît forța de interacțiune în r-un mediu oarecare. $\varepsilon_r$ se numește *permitivitatea relativă* a mediului în care se găsesc particulele încărcate electric, $\varepsilon$ *permitivitatea absolută* a acelui mediu, iar $\varepsilon_0$ este *permitivitatea absolută a vidului.* Așa cum se vede în relația (110) $\varepsilon_r$ este o constantă, care în vid are valoarea $\varepsilon_r = 1$. În tabelul 3 se dau valorile

TABELUL 3

| Substanța | $\varepsilon_r$ | Substanța | $\varepsilon_r$ |
|---|---|---|---|
| Apa | 80 | Sticlă | 5—10 |
| Vapori de apă | 1,0126 | Porțelan | 4,5—8 |
| Aer | 1,0006 | Bachelită | 4,5—5,5 |
| Hidrogen | 1,00026 | Ebonită | 2,5—3,5 |
| Bioxid de carbon | 1,00095 | Chihlimbar | 2,8 |
| Mica | 6—8 | Parafină | 1,9—2,5 |
| | | Petrol lampant | 2,0 |

Permitivitatea relativă a unor substanțe.



lui $\varepsilon_r$ pentru unele substanțe mai des întîlnite în practică. Valorile sînt raportate la temperatura de 0°C și la presiune atmosferică normală. Se observă că $\varepsilon_r$ pentru aer diferă foarte puțin de $\varepsilon_r$ pentru vid, în timp ce $\varepsilon_r$ pentru apă este de 80 ori mai mare decît $\varepsilon_r$ pentru vid. Valori mari ale lui $\varepsilon_r$ au, așa cum reiese din tabel, apa, porțelanul, mica, sticla etc. Se mai observă că pentru gaze $\varepsilon_r$ este practic egal cu unitatea.

Dacă comparăm legea lui Coulomb sub forma (109) cu legea gravitației universale a lui Newton, dată prin relația (67), observăm că maselor $M$ și $m$ le corespund sarcinile $q$ și $q_0$. Însă, în timp ce forța coulombiană poate fi atractivă sau repulsivă, forța newtoniană este numai atractivă, și aceasta fiindcă există un singur fel de masă.

Legea lui Coulomb a fost supusă la numeroase verificări experimentale, din ce în ce mai fine, mai rafinate. Ca urmare, unii experimentatori au stabilit că exponentul puterii lui $r$ nu este 2, ci $2 \pm 2 \cdot 10^{-9}$, iar alții au dat recent (1971) valoarea $2 \pm 3 \cdot 10^{-16}$ (Williams, Faller și Hill) folosindu-se în acest scop de un aparat destul de complicat și sensibil[1].

Experiența lui Coulomb cu celebra sa balanță de torsiune face parte din grupul experiențelor epocale în fizică[2] și, de aceea, ca un omagiu adus autorului ei, unitatea de măsură pentru sarcina electrică a fost numită *coulomb.* Pentru a ne da seama cît este de mare un coulomb vom da exemplul următor: dacă două particule ar fi încărcate fiecare cu sarcina electrică de un coulomb și s-ar afla la distanță de 1 m una de alta, atunci forța de interacțiune ar fi de cîteva miliarde de newtoni.

Charles Auguste de *Coulomb* (1736—1806), fizician francez, s-a născut în orașul Angoulême, provincia Angoumois, din vestul Franței, în ziua de 14 iulie, într-o veche familie de magistrați. Urmează școala militară, după absolvirea căreia obține titlul de inginer, încadrîndu-se în armată, la geniu. Activitatea de ofițer îi îngăduie să se ocupe de cercetări științifice și tehnice. El nu se mulțumește cu explicații calitative și reclamă necesitatea măsurătorilor precise și a matematicii.

[1] Vezi, de exemplu, *Fizica* de D. Halliday și R. Resnick, Editura didactică și pedagogică, București, 1975, vol. II, p. 56.

[2] Vezi *Experiențe epocale în fizică* de Henry S. Lipson, trad. din lb. engleză, p. 144—147, Ed. enciclopedică română, colecția Orizonturi, nr. 47, București, 1973.

Începînd din anul 1770 face cercetări în domeniul magnetismului, iar după patru ani începe cercetări și în domeniul electricității. În anul 1774, Coulomb este ales membru corespondent al Academiei de Științe din Paris, iar din 1781 membru titular.

Prima lucrare în domeniul electricității poartă titlul: „Construcția și folosirea unei balanțe electrice, bazată pe proprietatea firelor metalice de a avea o forță de torsiune proporțională cu unghiul de torsiune" și apare în anul 1785. De fapt, Coulomb nu se interesa propriu-zis de electricitate, ci de construcții de aparate cît mai sensibile și de utilizările lor. La început el a construit balanța de torsiune care-i poartă numele și apoi, în căutarea domeniilor de utilizare a ei, a ajuns la descoperirea legii. Aparatul a mai fost folosit, aproape în aceeași perioadă cu Coulomb, de către Cavendish (1731—1810) pentru determinarea constantei gravitației universale $k$.

Experiența lui Coulomb și a lui Cavendish fac parte din acele experiențe epocale în fizică (alături de experiența lui Michelson sau Michelson-Morley, experiența lui Joule, experiența lui Ohm, experiența lui Millikan ș.a.). În anul 1785 publică memoriul în legătură cu legea stabilită de el pe cale experimentală, iar după zece ani este numit membru în secția de fizică din „Institut de France", apoi inspector general al instrucțiunii publice.

## LEGEA LUI GAUSS

Vom defini acum o mărime fizică importantă în electricitate, numită *fluxul cîmpului electric* sau *fluxul vectorului electric* printr-o suprafață $S$.

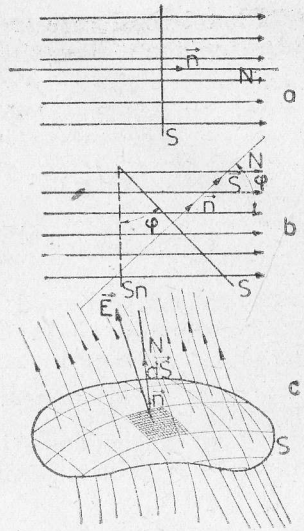
Noțiunea de flux al unui cîmp (flux al unui vector) printr-o suprafață se întîlnește la toate cîmpurile vectoriale, fiind o proprietate a acestora. Exemple de cîmpuri vectoriale sînt: cîmp de viteze, cîmp de forțe, cîmp magnetic etc.

Să considerăm o suprafață plană $S$ plasată într-un cîmp electric, normală pe liniile de cîmp (fig. 82, a); relația

$$\Phi = \vec{E} \cdot \vec{S}$$



Fig. 82. Pentru ilustrarea fluxului electric.




exprimă fluxul cîmpului electric $\vec{E}$ prin suprafața respectivă. Se vede că fluxul electric este proporțional cu aria suprafeței dacă $\vec{E}$ = const. și că este proporțional cu $\vec{E}$ cînd $\vec{S}$ este constant. În cazul că suprafața nu este perpendiculară pe liniile de cîmp (fig. 82, b), fluxul este dat de

$$\Phi = ES \cos \varphi = \vec{E} \cdot S\vec{n}, \qquad (111)$$

unde $\vec{n}$ reprezintă versorul normalei la suprafața $S$.

În expresia (111), $\varphi$ este unghiul dintre liniile de cîmp și direcția normalei pozitive la suprafața respectivă.

Evident, fluxul cîmpului electric este o mărime scalară. Cele expuse aici sînt valabile numai atunci cînd cîmpul electric este uniform, adică $\vec{E}$ = const. În cazul în care cîmpul este neuniform, se împarte suprafața respectivă în porțiuni elementare $dS$, astfel ca pe fiecare din aceste porțiuni intensitatea medie a cîmpului electric să fie constantă (fig. 82, c). În aceste condiții fluxul elementar al cîmpului electric este dat de

$$d\Phi = \vec{E} \cdot d\vec{S}.$$

Fluxul total care străbate întreaga suprafață se obține integrînd toate fluxurile $d\Phi$

$$\Phi = \int_S \vec{E}\, d\vec{S} \tag{112}$$

Se poate arăta că[1]

$$d\Phi = \frac{q}{4\pi\varepsilon}\, d\Omega \tag{113}$$

$d\Omega$ fiind unghiul solid elementar care cuprinde suprafața $dS$. Se observă că în expresia fluxului electric nu intră distanța $r$, ceea ce înseamnă că fluxul este independent de poziția suprafeței $dS$ față de locul în care se află particula încărcată electric.

Pentru întregul spațiu din jurul sursei generatoare a cîmpului, respectiv pentru sfera de suprafață $\Sigma$, relația (112) devine

$$\int_\Sigma \vec{E}\, d\vec{S} = \frac{q}{\varepsilon} \tag{114}$$

suma tuturor unghiurilor $d\Omega$ fiind egală cu $4\pi$.

Dacă sursa s-ar afla în exteriorul suprafeței, în acest caz fluxul total ar fi nul.

Relația (114) exprimă legea lui Gauss: *fluxul cîmpului electric printr-o suprafață închisă, luată într-un mediu izolant omogen și izotrop, este egal cu raportul dintre valoarea sarcinii electrice aflată în interiorul suprafeței închise considerate și permitivitatea absolută a mediului.*

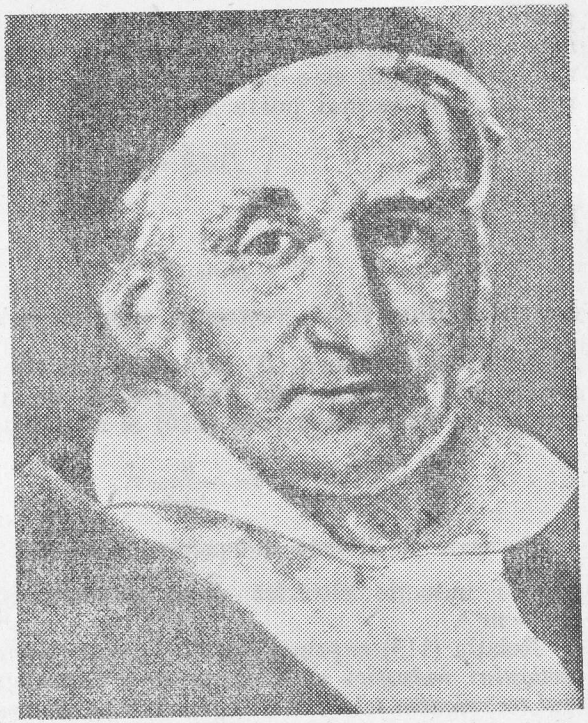
Legea lui Gauss este valabilă atît în cazul cînd sursa cîmpului este o particulă încărcată, cît și al unui corp de o formă oarecare încărcat electric sau mai multor corpuri purtînd sarcină electrică. Prin $q$ se va înțelege, întotdeauna, valoarea sarcinii electrice totale și va fi dată de suma algebrică a sarcinilor electrice.

Carl Friedrich *Gauss* (1777—1855), matematician, fizician, astronom și geodez german, profesor universitar la Göttingen. A fost director al Observatorului astronomic din Göttingen. Gauss a aplicat metode matematice în studiul electricității și magnetismului, iar împreună cu W.E. Weber a elaborat sistemul absolut de unități electromagnetice. Tot împreună cu Weber a construit pentru întîia oară telegraful electromagnetic în țara sa (1883). De la Gauss a rămas curba erorilor, denumită și *curba lui Gauss*. Mai numeroase sînt contribuțiile sale în matematică. Gauss a dat o teorie a liniilor geodezice și tot el a calculat orbitele a doi asteroizi denumiți Pallas și Ceres.

[1] Nu dăm aici demonstrația, care poate fi găsită în orice manual de electricitate.



**Carl Friedrich Gauss**



Legea lui Gauss sub forma dată mai sus, cunoscută și sub numele de *forma integrală a legii lui Gauss*, prezintă dezavantajul că nu spune nimic cu privire la distribuția particulelor (corpurilor) încărcate electric din interiorul suprafeței închise. Ea însă permite să se calculeze $q$ dacă se obține $\Phi$ pe altă cale.

Pentru a înlătura neajunsul menționat mai sus, expresiei matematice a legii lui Gauss i s-a dat o altă formă, numită *forma diferențială a legii lui Gauss*, cu ajutorul căreia se

poate determina distribuția particulelor (corpurilor) încărcate electric din interiorul unei suprafețe închise. Deoarece mediul considerat este omogen și izotrop, și deci $\varepsilon = \text{const.}$, relația (114) se mai poate scrie

$$\int_{\Sigma} \vec{D}\, d\vec{S} = q. \qquad (115)$$

Aici

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \qquad (116)$$

este o mărime fizică vectorială numită *inducție electrică*.

Această mărime fizică ($\vec{D}$) caracterizează cîmpul electric în fiecare din punctele sale, independent de mediul în care este creat. Într-adevăr, din (116) și cu (108), rezultă

$$\vec{D} = \frac{q}{4\pi r^3}\vec{r}.$$

Se vede că $D$ este independent de $\varepsilon$ ($\varepsilon_0$). Modulul vectorului inducție electrică $\vec{D}$ se măsoară în $C \cdot m^{-2}$ sau $A \cdot s \cdot m^{-2}$.

Relația (115) exprimă *legea lui Gauss generalizată: fluxul vectorului inducției electrice printr-o suprafață închisă este egal cu valoarea totală a sarcinii electrice cu care sînt încărcate particulele (corpurile) aflate în interiorul ei.*

Maxwell a arătat că, deși expresia (115) a fost stabilită pentru cîmpuri electrostatice, *este valabilă în toate cazurile, fără excepție, și pentru cîmpuri electrice variabile care variază oricît de repede.* Relația (115), cu o generalizare atît de extinsă, este considerată drept *postulatul fundamental al teoriei cîmpului electromagnetic*, numit și *postulatul lui Maxwell*.

Observăm că factorul $4\pi$ nu apare în legea lui Gauss, dar apare în expresii ce caracterizează simetria sferică. În general, factorul $4\pi$ nu apare în relațiile cele mai utilizate.

Legea lui Gauss a fost verificată experimental. Ea se aplică oricărei suprafețe ipotetice închise, numită *suprafață Gauss*. Pentru a aplica legea lui Gauss trebuie, întotdeauna, să găsim o suprafață pe care, datorită unor considerații de simetrie, $\vec{E}$ și unghiul dintre normala pozitivă la suprafață și $\vec{E}$ să fie constante ca valoare. Acest lucru este necesar



pentru ca din formula (112), scrisă sub forma scalară, $E \cos \varphi$ să poată fi scos în afara semnului integralei. Astfel se poate calcula ușor $\int_S dS$ și apoi $E$.

Ca o primă aplicație a legii lui Gauss vom arăta cum se poate deduce expresia matematică a legii lui Coulomb. Pentru aceasta vom considera, mai întîi, o sferă încărcată electric. În jurul ei se generează un cîmp electric, cîmp care este neuniform, deoarece cu cît crește depărtarea față de sferă cu atît liniile de cîmp se distanțează una de alta. Așa fiind, intensitatea cîmpului electric nu este constantă. Din motive de simetrie, liniile de cîmp au direcție radială (fig. 83, a), iar intensitatea cîmpului electric, pentru toate punctele care se găsesc la o anumită distanță dată față de centrul sferei, este constantă.

Să presupunem acum o particulă încărcată electric, situată într-un mediu izolant în centrul unei suprafețe sferice de rază $r$ (fig. 83, b). Intensitatea cîmpului electric este constantă pe suprafața sferei.

Datorită condițiilor de simetrie, direcția și sensul lui $\vec{E}$ sînt cunoscute. Împărțim suprafața sferei în porțiuni infinit mici $dS$; fluxul prin fiecare porțiune va fi dat de relația

$$d\Phi = \vec{E}\, d\vec{S}$$

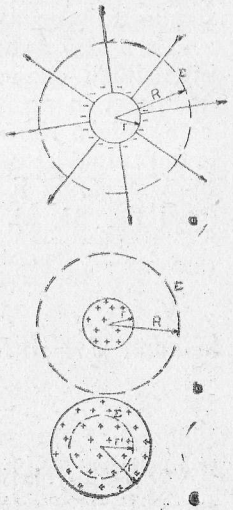



Fig. 83. Referitor la legea lui Gauss: aplicații.

În cazul de față, însă, cei doi vectori, sînt coliniari și au același sens, deci

$$d\Phi = \vec{E}\vec{n}\, dS = E\, dS$$

fiindcă $\vec{E}$ are direcția normalei la suprafața sferei (liniile de cîmp sînt normale pe suprafața sferei în orice punct).

Fluxul total, prin întreaga suprafață sferică, se calculează cu relația (112) scrisă scalar și folosind legea lui Gauss [relația (114)] și, ținînd seama că $\int_S dS = S = 4\pi r^2$, se obține

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon r^2}.$$

Utilizînd acum relația (106) vom avea

$$F = \frac{qq_0}{4\pi\varepsilon r^2}.$$

Așa cum am mai spus, legea lui Gauss constituie *prima* lege a electromagnetismului și în același timp una dintre ecuațiile cîmpului electromagnetic (așa cum au fost sintetizate ele de către Maxwell). Întrucît legea lui Coulomb poate fi dedusă din legea lui Gauss, ea nu face parte din sistemul de ecuații ale lui Maxwell.

Ca o altă aplicație a legii lui Gauss vom deduce expresia intensității cîmpului electric în exteriorul unei sfere conductoare, în următoarele cazuri:

a) Fie o sferă conductoare de rază $r$, uniform încărcată la suprafață și o sferă de rază $R$ care o cuprinde pe prima sferă și căreia îi aplicăm legea lui Gauss, forma integrală, (vezi fig. 83, a). Vom scrie

$$\Phi = ES = \frac{q}{\varepsilon}.$$

în care, $S = 4\pi R^2$. Efectuînd înlocuirile rezultă

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon R^2}.$$

Această relație ne spune că deoarece sarcina electrică totală cu care este încărcată sfera de rază $r$ este $q \neq 0$, atunci



$E \neq 0$. Deci intensitatea cîmpului electric generat în exterior de o suprafață sferică încărcată uniform la suprafață este aceeași ca în cazul cînd întreaga sarcină electrică ar fi concentrată în centrul sferei $\left(E \sim \frac{1}{R^2}\right)$. La această concluzie a ajuns Coulomb cu prilejul experiențelor sale. În interiorul sferei nefiind sarcină electrică, intensitatea cîmpului este nulă.

b) Să presupunem acum o sferă de rază $r$ încărcată cu sarcină electrică în tot volumul ei, astfel încît distribuția sarcinii este uniformă. În acest caz, $\rho = \frac{q}{V}$. Fie o sferă de rază $R$ ce cuprinde sfera considerată ($R > r$) (fig. 83, b). Aplicăm legea lui Gauss suprafeței sferice de rază $R$, aici $\Phi$ reprezentînd, evident, fluxul total prin suprafața acesteia. Din relația (114), în care $\vec{E}$ și $d\vec{S}$ sînt coliniari și de același sens, iar $E$ = const. rezultă

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon R^2}.$$

Așadar, intensitatea cîmpului, creat în exterior de sarcina electrică distribuită uniform în volumul sferei de rază $r$, are aceeași valoare ca și atunci cînd întreaga sarcină ar fi concentrată în centrul sferei. Observăm că rezultatul este similar cu cel din cazul precedent, al unei sfere conductoare încărcată uniform pe suprafața sa.

c) Să considerăm acum o sferă de rază $r' < r$, deci aflată în interiorul primei sfere și să-i aplicăm legea lui Gauss (fig. 83, c). Vom avea, efectuînd calculele ca și în cazul precedent,

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon r'^2} \cdot \rho \frac{4\pi}{3} r'^3 = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{q}{4\pi r^3} r'$$

și deci

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon r^3} r'.$$

Această relație ne spune că $E$ într-un punct din interiorul sferei încărcate, cu densitatea de sarcină volumică $\rho$, este direct proporțional cu $r'$.

## LEGEA LUI OHM

Se știe că atomul reprezintă cea mai mică parte dintr-un element, care păstrează toate însușirile elementului și că este alcătuit dintr-un nucleu și un înveliș electronic, electronii fiind repartizați pe nivele de energie. Numărul de electroni este egal cu numărul de protoni (particule care se găsesc în nucleu) și, de aceea, atomul este neutru din punct de vedere electric. Dacă printr-un procedeu oarecare atomului i se ia unul sau mai mulți electroni, el devine un *ion pozitiv*, iar dacă atomul primește unul sau mai mulți electroni devine un *ion negativ*. Se mai știe că electronii cei mai depărtați de nucleu sînt mai slab legați de acesta, prin forțe coulombiene și, de aceea, ei sînt mai independenți în mișcările lor. Într-adevăr, să considerăm doi ioni $I_1$ și $I_2$, pozitivi și un singur electron periferic. Pentru a studia mișcarea acestui electron vom mai presupune că diametrul traiectoriei sale este mai mare decît distanța dintre nucleele ionilor considerați. Din această cauză orbitele periferice se vor intersecta (fig. 84, a). În aceste condiții, electronul, în mișcarea sa, se va afla mai aproape, cînd de ionul $I_1$, cînd de ionul $I_2$, după cum el va parcurge arcul $AmB$ sau $AnB$. De exemplu, cînd se va mișca pe arcul $AnB$ el se va afla mai mult sub influența lui $I_2$, care-l va obliga să se miște în jurul său, în timp ce atunci cînd se va mișca pe arcul $AmB$ va fi supus influenței mai mari din partea lui $I_1$ care-l va obliga să se miște în jurul său. Astfel, traiectoria descrisă de acest electron, care de fapt aparține ambilor ioni nu numai unuia dintre ei, va avea forma simbolului infinit (fig. 84, b). În cazul mai multor ioni, electronul se va mișca succesiv în jurul tuturor ionilor; el va aparține tuturor acestor ioni. De aceea, I. I. Frenkel (1894—1952)

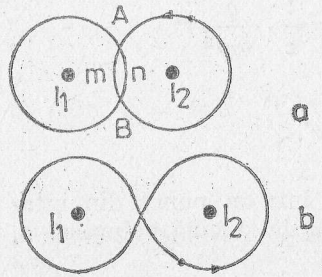



Fig. 84. Traiectoria descrisă de un electron, în cazul a doi ioni vecini.



a numit acest electron, *electron colectiv*[1], el aparținînd tuturor ionilor pozitivi din metal. Numai electronii periferici pot deveni colectivi și ei sînt aceia care asigură producerea curentului electric, deoarece—așa cum am spus mai sus—sînt mai independenți în mișcările lor în comparație, evident, cu electronii mai apropiați de nucleu. Mișcarea tuturor acestor electroni colectivi, în ansamblul ei, se aseamănă foarte bine cu mișcarea de agitație termică a moleculelor unui gaz și depinde de temperatură în ambele cazuri. Numai că la zero absolut mișcarea moleculară încetează, în timp ce mișcarea electronilor nu încetează niciodată.

Cele de mai sus conduc la concluzia că electronii periferici nu sînt propriu-zis liberi, ci cvasiliberi. Totuși, pentru comoditatea exprimării, deseori se vorbește despre *electroni liberi*.

Atenție! Cele de mai sus sînt valabile numai pentru metale. Metalele au o structură cristalină și fiecare cristal reprezintă o rețea spațială, tridimensională, între nodurile căreia există o distanță extrem de mică, de ordinul a $10^{-10}$ m; în noduri se găsesc ionii pozitivi ai metalului. Distanța dintre electronii cei mai depărtați de nucleele în jurul cărora ei gravitează și nucleele respective este în medie tot de ordinul a $10^{-10}$ m. De aceea, acești electroni (periferici) aparțin tuturor ionilor cristalului și ei sînt electronii colectivi despre care am vorbit mai sus. Desigur că acești electroni, chiar dacă sînt mai independenți în mișcările lor, nu pot părăsi cristalul din cauza forțelor atractive dintre ei și nuclee (forțe coulombiene). Toți acești electroni colectivi formează, așa cum spuneam, un gaz (gaz electronic), mișcarea lor asemănîndu-se, în unele privințe cu mișcarea moleculelor unui gaz și, de aceea, în anumite studii li se aplică rezultatele teoriei cinetice a gazelor (de exemplu, cînd se studiază efectul Edison)[2]. Electronii colectivi se mișcă cu viteze bine determinate, mișcarea lor putînd fi considerată extrem de lentă.

Să considerăm un conductor introdus într-un circuit în care se află un generator (un acumulator, de exemplu). Cînd se închide circuitul, în conductorul respectiv se stabilește un cîmp electric, a cărui intensitate are valori bine

[1] Vezi *Introducere în teoria metalelor* de I.I. Frenkel, p. 62, Ed. tehnică, București, 1954.

[2] Vezi, de exemplu, *Efecte fundamentale în fizică* de Gh. Hușanu, Ed. Albatros, București, 1975, p. 114.

determinate în fiecare punct al conductorului. Sub acțiunea acestui cîmp, electronii liberi (colectivi) se vor mișca după o direcție rezultantă în sens opus sensului cîmpului electric, iar prin conductor se spune că trece un *curent electric*. Așadar, *curentul electric constă din mișcarea dirijată, sub acțiunea cîmpului electric, a electronilor liberi, în general, a purtătorilor de sarcină electrică*. Desigur, ne întrebăm: care este viteza de propagare a curentului electric? Viteza depinde în primul rînd de natura conductorului. Unii sînt tentați să afirme că curentul electric se propagă cu viteza luminii. Este adevărat? Cu această viteză se propagă cîmpul electric care pune în mișcare electronii liberi. Aceștia, însă, se ciocnesc mereu de ionii rețelei cristaline și chiar cu alți electroni, cedînd acestora surplusul de energie cinetică primită din partea cîmpului, dar pentru foarte scurt timp, deoarece cîmpul electric existent le reface această energie. Din cauza ciocnirilor electronii își schimbă și direcția și sensul, unii dintre ei se întorc adesea, din cauza sensului contrar al mișcării lor (o iau înapoi). Dar și aceasta tot pentru foarte scurt timp. Iată deci că viteza de propagare a electronilor nu poate avea valoarea vitezei luminii. Viteza este determinată de intensitatea cîmpului electric. De exemplu, dacă intensitatea medie a cîmpului electric ar fi de $10^2$ V/m, atunci viteza acestor electroni ar fi de aproximativ $10^{-1}$ m/s.

Numai că o astfel de valoare pentru $E$ este foarte rar întîlnită. Dacă unui conductor cu lungimea de 1 km i s-ar aplica la capete o tensiune de 100 000 V, intensitatea cîmpului electric ar fi de $10^2$ V/m. De aceea, în realitate, valorile lui $E$ sînt cu mult mai mici decît valoarea considerată mai sus. Datorită acestui fapt și viteza electronilor este mică, de ordinul milimetrilor pe secundă sau fracțiuni de milimetru pe secundă. Rețelele de iluminat funcționează sub o tensiune de 220 V (mai sînt și rețelele de 110 sau 120 V, dar mai rar). Electronii din conductoarele acestor rețele au viteze de 1 — 3 mm/s. În timp de o oră ei parcurg o distanță de 3,6—10,8 m.

Dacă viteza de propagare a cîmpului ar fi egală cu viteza de deplasare a electronilor, ar însemna să deschidem întrerupătorul cu o jumătate de oră înainte de a avea nevoie de lumină. De exemplu, de la o hidrocentrală, cum ar fi aceea de la Bicaz, pînă la Bacău curentul ar ajunge în nici mai mult nici mai puțin de 12 luni! Așadar, băcăoanii ar trebui să aștepte un an de la conectarea întreruptorului de



către cei de la Bicaz pînă să ajungă curentul la ei. Și atunci, ne întrebăm iar: care este viteza de propagare a curentului electric?

Pînă să dăm răspunsul, ne vom ocupa de o problemă. Am spus că în conductor cîmpul electric se propagă cu viteza luminii. Acesta pune în mișcare dirijată, simultan, toți electronii. Așa fiind, electronii de la capătul conductorului legat la întreruptor nu vor ajunge la capătul legat la bec decît foarte tîrziu; în acest timp însă aici se vor mișca dirijat alți electroni liberi. Acum cred că putem da răspuns la întrebare: curentul electric se propagă prin conductoare cu o viteză a cărei valoare este egală, practic, cu valoarea vitezei luminii, deci cu viteza de propagare a cîmpului electric. Într-adevăr, un semnal electric străbate conductoarele cu o viteză foarte apropiată de viteza luminii[1], practic, egală cu aceasta. Cele spuse mai sus au avut în vedere curentul continuu, în care electronii se deplasează într-un singur sens. În cazul curentului alternativ, însă, electronii nu se deplasează la distanțe mari, ci ei oscilează în jurul unei poziții medii.

În vid, viteza de deplasare a electronilor (nu a curentului electric) este cu mult mai mare decît în conductoare, deoarece aici electronii nu suferă ciocniri. De exemplu, în cazul unei diode cu vid înaintat (kenotron) distanța dintre anod și catod este parcursă de electroni cu o viteză de aproximativ $9 \cdot 10^3$ km/s. În tuburile cinescop, folosite după cum știm în televiziune, viteza electronilor este și mai mare, deoarece aici ei sînt accelerați de către un cîmp electric creat de o tensiune de ordinul $10^3$—$10^4$ V. În concluzie, viteza electronilor variază între valori de ordinul fracțiunilor de milimetru pe secundă și valori de ordinul $10^4$ km/s, în timp ce curentul electric se propagă cu o viteză, practic, egală cu viteza luminii.

Curentul electric este caracterizat prin *mărime* și *sens*. Mărimea curentului electric se numește *intensitate* și se definește ca limita raportului dintre variația sarcinii electrice a purtătorilor de sarcină (a electronilor, în cazul conduc-

[1] Viteza undelor electromagnetice în mediul respectiv. Această viteză se calculează cu relația: $v = 1/\sqrt{\varepsilon\mu}$. În vid, $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$.

toarelor metalice) care trec prin secțiunea transversală a unui conductor și intervalul de timp corespunzător

$$i = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}.$$

Dacă curentul electric este constant în timp, atunci

$$I = \frac{q}{t}.$$

De aici, definim *intensitatea curentului* ca *raportul dintre sarcina electrică ce trece prin secțiunea transversală a unui conductor și intervalul de timp corespunzător.*

Cu $i$ se notează curentul variabil în timp, iar cu $I$ curentul electric constant în timp. Intensitatea curentului electric este o mărime scalară.

Ca sens al curentului electric se ia *sensul pozitiv, pe deoparte și sensul purtătorilor de sarcină, pe de altă parte. Sensul pozitiv al curentului electric este sensul contrar mișcării dirijate a electronilor, iar sensul purtătorilor de sarcină este sensul de deplasare dirijată a ionilor sub acțiunea cîmpului electric.* De exemplu, în soluții electrolitice (unde există un curent în ambele sensuri — curentul datorit ionilor pozitivi și curentul datorit ionilor negativi), în descărcările electrice în gaze.

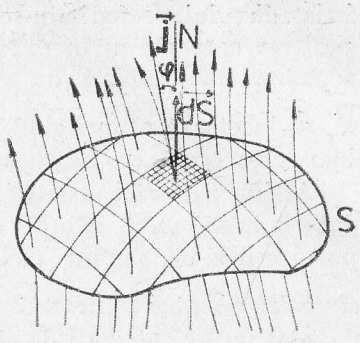
Intensitatea curentului electric este o mărime macroscopică caracteristică în circuitele de curent continuu. (În circuitele de curent alternativ mărimea caracteristică este *intensitatea efectivă* a curentului electric $I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$). Acestei mărimi macroscopice i se atașează o mărime microscopică numită *densitate de curent.* Densitatea de curent este o mărime vectorială atașată fiecărui punct din conductor (nu întregului conductor) și are modulul dat de

$$j = \frac{di}{dS}, \qquad (117)$$

adică raportul dintre curentul ce trece printr-un element de suprafață normal pe direcția curentului și aria elementului de suprafață (fig. 85). Sensul acestui vector este



Fig. 85. Pentru ilustrarea densității de curent.




opus sensului de mișcare al electronilor, adică are sensul cîmpului electric. Referindu-ne la figura 85, vom spune că prin întreaga suprafață va trece un curent

$$i = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = \int_S j dS \cos(\widehat{\vec{j}, d\vec{S}}). \qquad (118)$$

Dacă direcția curentului este normală la suprafața considerată și vectorul $\vec{j}$ are aceeași valoare în toate punctele suprafeței $i = I$ și din (118) se obține

$$I = jS, \qquad (119)$$

relație care este valabilă în cazul unui curent constant în timp și cînd conductorul este filiform, adică are dimensiuni transversale neglijabile în comparație cu lungimea lui. Densitatea de curent se exprimă în $A/m^2$.

Așa cum în cîmpul electric se definesc linii ale vectorului cîmp și aici se definesc *linii ale vectorului densitate de curent*; sînt linii care se pot construi în spațiul în care există curent electric, în așa fel încît în orice punct al lor vectorul densitate de curent să coincidă cu tangenta geometrică. Vom numi *tub de curent domeniul din spațiu în care există curent electric, limitat de o suprafață tubulară formată dintr-un ansamblu de linii de curent.*

Cînd un disc circular metalic este pus în mișcare de rotație în jurul axului său, se constată că între ax și periferia discului apare o tensiune electrică. Explicația fenomenului este simplă: în timpul rotației, forța centrifugă acționează asupra electronilor liberi deplasîndu-i spre peri-

feria discului, separîndu-se astfel de sarcinile electrice pozitive care rămîn în exces în jurul axului. Dar această separare este însoțită de apariția unui cîmp coulombian, $\vec{E}_c$ și încetează atunci cînd forța datorită cîmpului coulombian este egală cu forța centrifugă.

Acțiunea forței centrifuge poate fi interpretată ca datorîndu-se unui cîmp electric ce acționează asupra purtătorilor de sarcină electrică. Acest cîmp se numește *cîmp imprimat* și se notează cu $\vec{E}_i$.

Sînt multe categorii de cîmpuri imprimate. De exemplu, cîmpuri imprimate de contact, care apar într-un strat îngust, de ordinul de mărime al distanțelor moleculare, la contactul a două corpuri. Așa sînt cîmpurile imprimate voltaice, la contactul a două metale diferite; cîmpurile galvanice, la contactul între un metal și un electrolit și cîmpurile fotovoltaice, la contactul dintre un metal și un semiconductor sub acțiunea radiațiilor electromagnetice. În fine, mai trebuie să amintim aici și cîmpurile termoelectrice de contact (efectul Seebeck)[1] și cîmpurile imprimate de contact între izolanți[2].

Domeniul din spațiu în care există un cîmp imprimat se numește *sursă*. Mișcarea purtătorilor de sarcină în sursă se face sub acțiunea cîmpului imprimat, deci asupra lor acționează forțe neelectrice. În exteriorul sursei, însă, în receptor, mișcarea purtătorilor de sarcină se face sub acțiunea cîmpului coulombian. Cu această pregătire preliminară putem trece să abordăm legea lui Ohm sub diversele ei aspecte. Mai întîi vom preciza că între vectorii $\vec{j}$ și $\vec{E}$ există relația

$$\vec{j} = \sigma\vec{E} \qquad (120)$$

unde $\sigma = 1/\rho$; (120) exprimă *legea lui Ohm în forma locală (diferențială)*, în absența unui cîmp electric imprimat.

[1] Vezi de exemplu *Efectul Seebeck*, în *Efecte fundamentale în fizică* de Gh. Hușanu, Edit. Albatros, București, 1975, p. 277.

[2] Cititorilor interesați le recomandăm, de exemplu, *Fizica generală* de I.C. Moisil și Gh. Hușanu, Editura didactică și pedagogică, București 1968, p. 60–62.



Relația (120)[1] este valabilă în cazul cînd mediul este izotrop, deoarece numai într-un astfel de mediu liniile vectorului cîmp electric coincid cu liniile vectorului densitate de curent, adică cei doi vectori $\vec{E}$ și $\vec{j}$ au aceeași linie de acțiune și același sens. În medii izotrope, liniile de curent intersectează suprafețele echipotențiale sub un unghi de 90°. În medii anizotrope, însă, situația este cu totul alta. În astfel de medii cei doi vectori, $\vec{j}$ și $\vec{E}$, au linii de acțiune (direcții) diferite și deci liniile vectorului densitate de curent nu mai coincid cu liniile vectorului cîmp electric. Relația (120) reprezintă forma locală a legii lui Ohm, deoarece ea se referă la un singur punct bine determinat al conductorului. Această lege se aplică tuturor conductoarelor, de orice formă, fie că sînt sau nu omogene.

În cazul în care există și un cîmp electric imprimat, legea lui Ohm în formă locală se scrie

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E}_c + \vec{E}_i). \qquad (121)$$

Să considerăm acum o porțiune, de lungime $l$, dintr-un conductor, limitată de secțiuni transversale avînd ariile $S_1$ și respectiv $S_2$, fiecare dintre ele fiind o suprafață echipotențială (fig. 86, a). Facem presupunerea că pe porțiunea considerată nu există surse de tensiune electromotoare. În interiorul acestei porțiuni vom considera un tub de curent avînd secțiunea transversală $dS$ perpendiculară pe

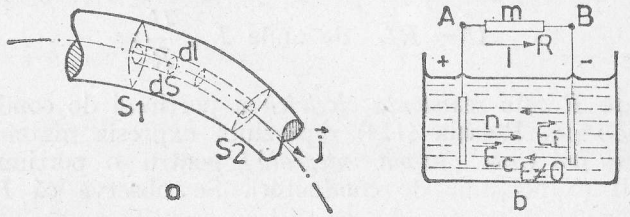



Fig. 86. Referitor la demonstrarea legii lui Ohm: a — pentru o porțiune de circuit; b — pentru un circuit întreg (închis).

[1] Se poate obține ușor astfel: se știe că $E = \frac{dU}{dl}$, $dU = RdI$ și $dI = jdS$; cu aceste relații se obține: $\vec{E} = \rho\vec{j}$ și de aici relația (120).

axa tubului. Această secțiune este în general variabilă în lungul tubului. Fie o porțiune elementară $dl$ din lungimea tubului și considerînd conductorul izotrop vom scrie

$$U = \int_l \vec{E}\, d\vec{l} = \int_l E\, dl. \qquad (122)$$

Am scris fără săgeți deoarece în medii izotrope linia de acțiune a lui $\vec{E}$ coincide cu direcția tubului de curent. $U$ este diferența de potențial (tensiunea) dintre extremitățile porțiunii de conductor considerată.

Relația (122) se mai scrie, ținînd seama de (120),

$$U = \int_l \rho j\, dl.$$

Substituind acum pe $j$ din (117), vom avea

$$U = \int_l \rho \frac{di}{dS}\, dl = di \int_l \frac{\rho}{dS}\, dl. \qquad (123)$$

În cazul în care $\rho$ nu depinde de $j$, atunci $di \sim U$ și cum $U$ este același pentru toate tuburile de curent din interiorul porțiunii de conductor considerate inițial, putem calcula pe $I$ ca suma tuturor curenților elementari $di$, pentru diferite tuburi de curent, $I$ fiind intensitatea curentului electric în tot conductorul. Rezultă atunci că $I$ este direct proporțional cu $U$ și, deci, putem scrie

$$U = RI, \quad \text{de unde} \quad I = \frac{U}{R}, \qquad (124)$$

în care $R$ este *rezistența electrică* a porțiunii de conductor considerate. Relația (124) reprezintă expresia matematică a *legii lui Ohm (forma integrală)* pentru o porțiune de circuit (o porțiune de conductor). Se observă că $I \sim U$ cînd $R = \text{const.}$ și că $I \sim \frac{1}{R}$ cînd $U = \text{const.}$ Formula (124) ne arată că într-un conductor a cărui rezistență electrică este $R$ și are la extremități o tensiune $U$, intensitatea curentului electric se obține făcînd raportul celor două mărimi cunoscute, $U$ și $R$.

Considerînd acum un conductor liniar, omogen, cu secțiunea transversală constantă și aplicînd relația (124), în



care $dS$ este constant în lungul fiecărui tub de curent, vom scrie

$$di = \frac{U}{\frac{\rho}{dS}\int_l dl} = \frac{U}{\rho l}\, dS$$

și de aici

$$I = \int di = \frac{U}{\rho l}\int_S dS$$

de unde

$$I = \frac{U}{\rho \frac{l}{S}} = \frac{U}{R}$$

în care

$$R = \rho \frac{l}{S}. \qquad (125)$$

Rezistența electrică $R$ este o caracteristică a fiecărui conductor și se manifestă ca proprietatea conductorului de a se opune trecerii curentului electric. Rezistența electrică a unui conductor (denumit și *rezistor*) se exprimă în ohmi ($\Omega$), în cinstea fizicianului Ohm. Conductanța electrică a rezistorului, $G$, se exprimă în $\Omega^{-1}$ $\left(G = \frac{1}{R}\right)$.

Din (124), avem

$$R = \frac{U}{I}. \qquad (126)$$

Așadar, cunoscînd tensiunea $U$ de la capetele unui rezistor (căderea de tensiune) și intensitatea curentului electric ce-l străbate, putem obține, cu ajutorul relației (126), valoarea rezistenței electrice a rezistorului. $R$ depinde de natura materialului din care este confecționat conductorul (rezistorul).

Inversul lui $\rho$ se notează cu $\sigma$ $\left(= \frac{1}{\rho}\right)$ și se numește *conductivitate electrică* a conductorului (a rezistorului). $\rho$ se

măsoară în $\Omega \cdot m$, iar $\sigma$ în $(\Omega \cdot m)^{-1}$; $\rho$ (deci și $\sigma$) variază cu temperatura rezistorului.

La temperatură normală, cea mai mare conductivitate o au argintul și aurul. Conductivitatea se micșorează dacă metalul din care este confecționat conductorul conține impurități. De aceea, în practică se folosesc metale electrolitice, ca aluminiul și cuprul. Dar conductivitatea electrică este influențată și de prelucrarea mecanică a materialului conductor.

În tabelul 4 se dau unele proprietăți ale unor substanțe conductoare.

TABELUL 4

| Densitatea (kg/m³) | Temperatură de topire (°C) | Materialul | Rezistivitatea (la 20° C) |
|---|---|---|---|
| $2{,}7 \cdot 10^3$ | 659 | Aluminiu | $2{,}8 \cdot 10^{-8}$ |
| $8{,}9 \cdot 10^3$ | 1 080 | Cupru | $1{,}7 \cdot 10^{-8}$ |
| $1{,}9 \cdot 10^3$ | 3 500 | Carbon (amorf) | $3{,}5 \cdot 10^{-5}$ |
| $7{,}8 \cdot 10^3$ | 1 530 | Fier | $1{,}0 \cdot 10^{-7}$ |
| $8{,}4 \cdot 10^3$ | 910 | Manganin | $4{,}4 \cdot 10^{-7}$ |
| $8{,}9 \cdot 10^3$ | 1 450 | Nichel | $6{,}8 \cdot 10^{-8}$ |
| $10{,}5 \cdot 10^3$ | 960 | Argint | $1{,}6 \cdot 10^{-8}$ |
| $7{,}7 \cdot 10^3$ | 1 510 | Oțel | $1{,}8 \cdot 10^{-7}$ |
| $19{,}0 \cdot 10^3$ | 3 400 | Wolfran (tungsten) | $5{,}6 \cdot 10^{-8}$ |

Constante ale unor substanțe.

Relația (124) se mai poate obține[1] din (119), folosind expresia densității de curent și relația $E = U/l$.

Formula (125) se aplică la calcularea rezistenței rezistoarelor filiforme, adică a conductoarelor ale căror dimensiuni transversale sînt neglijabile în comparație cu lungimea lor. Formula se aplică chiar dacă conductoarele prezintă curburi sau dacă sînt în întregime curbate, cu condiția ca raza de curbură să fie mult mai mare decît dimensiunile transversale ale conductorului; așa este cazul conductoarelor din care sînt confecționate bobinele, reostatele ș.a. Pentru alte cazuri de conductoare se aplică metodele teoriei cîmpului.

[1] $j = \sigma E = \frac{1}{\rho} E = \frac{U}{\rho l} = \frac{I}{S}$, de unde $I = \frac{U}{\rho \frac{l}{S}} = \frac{U}{R}$.



Pentru a ajunge la expresia matematică a legii lui Ohm pentru un circuit închis vom lua în considerare un circuit închis, care cuprinde o sursă de tensiune electromotoare sub acțiunea căreia în circuitul considerat apare curentul, electric $I$ (fig. 86, b). În interiorul generatorului există un cîmp electric rezultant, $\vec{E}$. Sensul acestui cîmp coincide cu sensul liniilor de curent. Aceasta înseamnă că sensul lui $\vec{E}$ trebuie să fie de la electrodul negativ la electrodul pozitiv. Dar cîmpul rezultant $\vec{E}$ este format din două cîmpuri, care se suprapun în interiorul generatorului — unul coulombian datorită sarcinilor electrice de pe electrozi și altul de natură neelectrostatică, care este cîmpul imprimat. Așadar, vom avea

$$\vec{E} = \vec{E}_c + \vec{E}_i.$$

Aplicăm integrala de linie a vectorului cîmp electric de-a lungul drumului $BnA$, adică de la electroul negativ la electrodul pozitiv.

$$\int_{BnA} \vec{E}\, d\vec{l} = \int_{BnA} \vec{E}_c\, d\vec{l} + \int_{BnA} \vec{E}_i\, d\vec{l}. \qquad (127)$$

Dar integrala de linie a vectorului $\vec{E}_c$ nu depinde de alegerea drumului de integrare, ca și integrala de linie a vectorului cîmp electrostatic. De aceea vom scrie

$$\int_{BnA} \vec{E}_c\, d\vec{l} = \int_{BmA} \vec{E}_c\, d\vec{l} = -\int_{BmA} \vec{E}_c\, d\vec{l}.$$

Cu aceasta, relația (127) devine

$$\int_{BnA} \vec{E}_i\, d\vec{l} = \int_{AmB} \vec{E}_c\, d\vec{l} + \int_{BnA} \vec{E}\, d\vec{l}. \qquad (128)$$

Membrul întîi se notează cu $\mathcal{E}$ și se numește, prin definiție, *tensiune electromotoare* a generatorului și cum în exteriorul generatorului $\vec{E}_c = \vec{E}$ (deoarece în exteriorul generatorului nu există surse de t.e.m.), relația (128) devine

$$\mathcal{E} = \int_{AmB} \vec{E}\, d\vec{l} + \int_{BnA} \vec{E}\, d\vec{l}. \qquad (129)$$

În relația (129) primul termen din membrul al doilea reprezintă *căderea de tensiune pe porțiunea exterioară* a circuitului, iar termenul al doilea reprezintă *căderea de tensiune în interiorul* generatorului. Cu aceasta (129) se scrie

$$\mathcal{E} = U + u \tag{130}$$

unde

$$U = \int_{AmB} \vec{E}\, d\vec{l} = RI \tag{131}$$

conform cu (122), iar

$$u = \int_{BnA} \vec{E}\, d\vec{l} = rI. \tag{132}$$

Folosind (131) și (132), (130) se scrie

$$\mathcal{E} = (R + r)I$$

de unde

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \tag{133}$$

Relația (133) exprimă *legea lui Ohm integrală, pentru un circuit închis*. Tensiunea electromotoare $\mathcal{E}$ a generatorului se măsoară în volți, $R$ este rezistența electrică a circuitului exterior, iar $r$ rezistența electrică interioară a generatorului. Dacă în locul unui singur generator sînt mai multe surse de t.e.m., atunci $\mathcal{E}$ reprezintă t.e.m., totală, a tuturor generatoarelor, $r$ rezistența interioară echivalentă surselor de t.e.m., $R$ rezistența totală exterioară.

În relațiile întîlnite mai sus, $U$, $I$ și $R$ sînt mărimi *macroscopice*, ele aplicîndu-se unui corp oarecare dat; se mai pot aplica și unei regiuni continue oarecare dată. Acestor mărimi macroscopice le corespund $\vec{E}$, $\vec{j}$ și $\rho$, care sînt mărimi *microscopice*, deoarece valorile lor depind de punctul ales în conductor (rezistor). Relația (126), exprimă legătura dintre mărimile macroscopice, iar relația (120) legătura dintre mărimile microscopice.

Se poate demonstra că din mărimile microscopice se pot obține mărimile macroscopice, folosind însă calculul integral.



Cînd facem măsurători electrice pe conductoare reale, $U$, $I$ și $R$ sînt mărimi fundamentale; valorile lor le citim pe instrumentele de măsură corespunzătoare: voltmetru, ampermetru și, respectiv, ohmmetru. Mărimile $\vec{E}$, $\vec{j}$ și $\rho$ sînt mai importante în fizica corpului solid.

Să considerăm un circuit din care fac parte diverși receptori și un generator de energie electrică. Dacă se măsoară cu un voltmetru tensiunea la bornele generatorului cînd circuitul este deschis, se citește o valoare $U'_b = \mathcal{E}$. Închidem circuitul și citim la voltmetru o valoare $U''_b = U$. Comparînd citirile constatăm că $U < \mathcal{E}$. În fine, menținînd circuitul închis și măsurînd tensiunea (adică, corect, căderea de tensiune) de la bornele fiecărui receptor și adunîndu-le constatăm că suma lor este egală cu $U$

$$\sum_1^n U_k = U.$$

Să notăm diferența dintre $\mathcal{E}$ și $U$ cu $u$; vom scrie

$$u = \mathcal{E} - U. \tag{134}$$

Cine este acest $u$? Cînd circuitul este închis, curentul trecînd prin interiorul generatorului, a cărui rezistență este $r$, provoacă o cădere de tensiune care se calculează cu ajutorul relației de forma (131). Deci

$$u = rI.$$

Folosind (131) și (132), (134) ne dă

$$\mathcal{E} = U + u = (R + r)I$$

de unde se obține relația (133) (pe altă cale).

Relația (133), ca și (126), a fost demonstrată matematic. Dar scopul nostru este în primul rînd să aprofundăm fenomenele din punct de vedere fizic. Unele demonstrații, care au fost relativ simple, le-am dat pentru a satisface dorința unora dintre cititori, cărora matematica le procură o mare plăcere, constituind chiar o pasiune.

Vom face unele precizări, foarte importante. În primul rînd expresia (126) este considerată, în prezent, ca o definiție generală a rezistenței electrice a unui conductor. În al doilea rînd, graficul din figura 87,a arată că rezistența conductorului, căruia i se aplică la capete o tensiune $U$

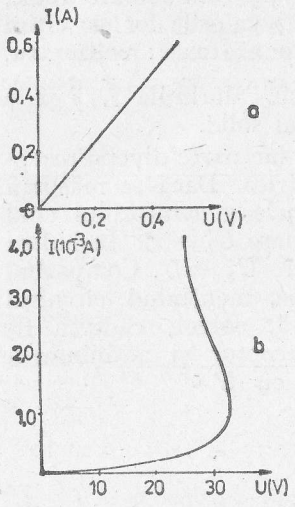



Fig. 87. Variația intensității curentului electric în funcție de tensiunea electrică.

și prin care trece un curent electric $I$, nu depinde de tensiunea aplicată. Tocmai acest rezultat este numit de fapt *legea lui Ohm* și este valabil pentru conductoare metalice.

Legea lui Ohm nu are valabilitate generală. Sînt destule conductoare cărora nu li se poate aplica legea lui Ohm. Cel mai interesant exemplu este acela al unui tip de termistor, a cărui curbă de variație a lui $I$ în funcție de $U$ este dată în fig. 87,b. De asemenea, nu se respectă legea lui Ohm nici în cazul detectoarelor cu semiconductoare, sau în cazul tranzistoarelor și nici la tuburile electronice cu vid.

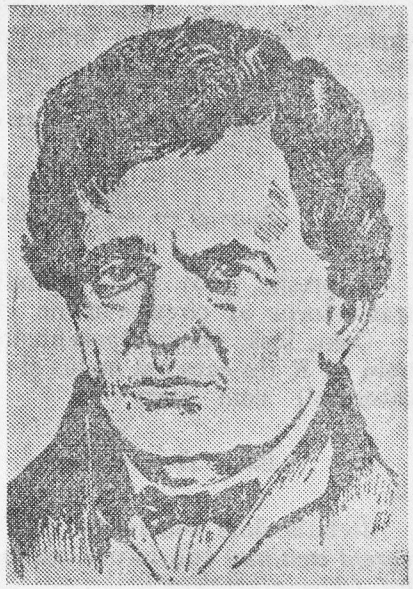
Legea lui Ohm este valabilă pentru un conductor (rezistor), numai dacă graficul funcției $I = f(U)$ este o dreaptă, adică $R$ nu depinde de $I$ sau $U$. Referindu-ne la expresia (120) vom spune că dacă pentru un rezistor $E = f(j)$ este o dreaptă, $\rho$ nu depinde de $E$ sau $j$ și rezistorul se conformează legii lui Ohm.

Dacă legea lui Gauss este o lege generală a electromagnetismului, legea lui Ohm nu este, deoarece ea este specifică numai unor anumite materiale.

George Simon *Ohm* (1787—1854), fizician german. Domeniile preocupărilor sale au fost electricitatea, optica și acustica. Studiind trecerea curentului prin conductoare a descoperit legea care-i poartă numele, în anul 1827. Cu un an înainte, în 1826,



**George Simon Ohm**



el făcuse o delimitare clară și precisă a noțiunilor de cădere de tensiune, intensitate a curentului și forță electromotoare (azi tensiune electromotoare). Tot Ohm a stabilit factorii de care depinde rezistența unui conductor și a introdus noțiunea de conductivitate electrică.

Ohm a folosit un aparat foarte complicat care constă dintr-o balanță de torsiune, în genul celei folosite de Coulomb și ca sursă de energie electrică, efectul Seebeck. Era foarte meticulos și dădea importanță la toate amănuntele. Aceste calități, indispensabile unui fizician, sînt comparate uneori cu entuziasmul copilăresc al lui Faraday. Orice fizician, însă, trebuie să aibă alături de calitățile lui Ohm și entuziasmul lui Faraday.

În timpul lucrărilor sale, Ohm a constatat că intensitatea curentului este invers proporțională cu o mărime care depinde de lungimea conductorului folosit și de diametrul lui. Ohm a numit această mărime rezistență electrică a conductorului. De aceea, unitatea de măsură a primit numele său.

Faptul că rezultatul experiențelor complicate ale lui Ohm a fost extrem de simplu, i-a pricinuit o multitudine de necazuri, deoarece nu i se recunoaște valoarea lucrărilor. Opera sa și-a primit consacrarea, însă, datorită Societății Regale a Angliei.

Să considerăm acum un circuit complex, în care apar variații ale fluxului de inducție magnetică. În acest caz vor exista atît $\mathcal{E}_i$, $\mathcal{E}_a$ cît și $\mathcal{E}_m$[1] și deci tensiunea electromotoare totală din circuit va fi suma acestora, la care se va adăuga tensiunea electromotoare a generatorului $\mathcal{E}$. Deci

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E} - \frac{d\Phi}{dt} - L\frac{dI}{dt} - M\frac{dI'}{dt}. \qquad (135)$$

Expresia (135) este valabilă numai pentru regimul tranzistoriu al circuitelor de curent continuu.

Cum, însă, rezistența echivalentă a circuitului o putem nota cu $R$ (în care am inclus și rezistența interioară a generatorului) vom avea

$$RI = \mathcal{E} - \frac{d\Phi}{dt} - L\frac{dI}{dt} - M\frac{dI'}{dt}. \qquad (136)$$

Relația dată sub forma (136) exprimă *legea lui Ohm în curent continuu* sub forma cea mai generală denumită *legea lui Ohm generalizată*.

În cazul particular, care se întîlnește cel mai adesea, $\mathcal{E}_a$ și $\mathcal{E}_m$ sînt neglijabil de mici și atunci (136) devine

$$RI = \mathcal{E} - L\frac{dI}{dt}.$$

În acest caz curentul electric suferă o variație permanentă sau tranzitorie, iar inductanța are valori care nu pot fi neglijate.

În curent alternativ legea lui Ohm este mult mai complicată. Numai pentru a ne face o imagine o dăm aici

$$I = \frac{U}{Z}$$

în care $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ este *impedanța circuitului* și se măsoară în *ohmi*. (Impedanța reprezintă o rezistență echivalentă în curent alternativ. Inversul ei se numește *admitanță* și se măsoară în *siemens*; $X_L = \omega L$ — *reactanță inductivă* și se măsoară în *ohmi*; $\omega = 2\pi\nu$ — pulsația curentului alternativ, în *radiani pe secundă*; $\nu$ — frecvența, în *herți*; $X_C = \frac{1}{C\omega}$ — *reactanța capacitivă*, de asemenea în *ohmi*.)

$X_L$ este rezistența pe care o opune trecerii curentului electric o bobină cînd este introdusă într-un circuit de curent alternativ, iar $X_C$ este rezistența opusă de un capacitor cînd se află într-un circuit de curent alternativ. Cele spuse sînt valabile cînd $R$, $L$ și $C$ sînt legate în serie. Dacă sînt legate în paralel atunci

$$I = U\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(C\omega - \frac{1}{L\omega^2}\right)^2}$$

[1] Reamintim cititorului că $\mathcal{E}_i$ reprezintă tensiunea electromotoare de inducție, $\mathcal{E}_a$ tensiunea electromotoare de autoinducție, iar $E_m$ tensiunea electromotoare de inducție mutuală.



## LEGILE LUI KIRCHHOFF

Am arătat mai înainte ce reprezintă, în general, curentul electric. Sînt, însă, cîteva tipuri de curenți electrici pe care-i vom aminti aici: *de conducție, de transport, de deplasare*.

În conductoarele solide sau lichide trecerea curentului electric se realizează prin deplasarea purtătorilor mobili de sarcină electrică, sub acțiunea cîmpului electric care se stabilește în ele. Forțele coulombiene produc o mișcare uniform accelerată a purtătorilor de sarcină. Dar datorită ciocnirilor repetate pe care le suferă, viteza medie a particulelor încărcate electric este constantă, fără a depinde de drumul macroscopic pe care-l parcurg. În conductoarele solide, purtătorii de sarcină sînt electronii de conducție, iar în semiconductoare — electronii și golurile. Un astfel de curent electric se numește *curent de conducție*.

Curentul electric datorit deplasării dirijate a unor sisteme de particule încărcate cu sarcină electrică este numit *curent de transport* sau *de convenție*. Exemple: curentul creat de deplasarea ionilor (radicalilor) din soluțiile electrolitice, curentul electric în gaze și în vid sau curentul datorit mișcării unui izolant sau conductor încărcat.

În sfîrșit, *curentul de deplasare* (denumire dată de către Maxwell) se datorește variațiilor cîmpului de inducție electrică în timp (deci fluxului electric), însoțite, în aceeași regiune din spațiu, de apariția unui cîmp magnetic rotațional, variabil și el în timp. Orice flux electric care variază în timp și poate să producă un cîmp magnetic rotațional este numit curent de deplasare. *Curenții de deplasare sînt totdeauna variabili în timp.*

Aceste trei tipuri de curenți au unele efecte comune ca, de exemplu, efectul magnetic. Suma acestor curenți printr-o suprafață oarecare reprezintă curentul electric și se numește *curent total*. Sînt situații cînd poate lipsi unul dintre curenți sau chiar doi dintre ei.

Dacă notăm cei trei curenți cu $i_c$, $i_t$ și respectiv $i_d$ atunci

$$i = i_c + i_t + i_d = 0.$$

Notînd cu $\vec{j}$ densitatea de curent, independent de natura lui, vom scrie, pentru orice suprafață închisă

$$i = \oint_{\Sigma} \vec{j} \cdot d\vec{S} = 0. \qquad (137)$$

Prin urmare, curentul electric total care trece prin orice suprafață închisă, situată într-un mediu oarecare, este egal cu zero. Se consideră pozitivi curenții care ies din suprafața închisă și negativi cei care intră în suprafață. Rezultă de aici că liniile de curent sînt curbe închise, ele nu au nici început și nici sfîrșit. Curentul electric circulă întotdeauna pe căi închise.

Un ansamblu de generatoare și receptoare conectate între ele într-un anumit mod formează ceea ce se numește un *circuit electric* sau o *rețea electrică* și este caracterizată prin noduri, laturi și ochiuri.

*Nodurile* sînt puncte ale circuitului în care se întîlnesc și fac contact electric trei sau mai multe conductoare.

*Laturile* reprezintă drumul parcurs de curent între două noduri succesive ale unei rețele. Important este faptul că în orice secțiune a unei laturi de rețea curentul electric are aceeași intensitate.



*Buclele* de rețea sau *ochiurile* sînt drumuri închise alcătuite din laturi ale rețelei.

Într-o latură oarecare pot fi: receptoare și surse de tensiune electromotoare, numai surse, sau numai receptoare.

Prin definiție, două conductoare se află în contact atunci cînd au foarte multe puncte pentru care distanța dintre conductoare este de ordinul $10^{-10}$ m. În această situație, particulele purtătoare de sarcină electrică pot să treacă cu ușurință dintr-un conductor într-altul.

În cazul curentului electric continuu printr-un conductor repartiția purtătorilor de sarcină electrică este staționară și trebuie să rămînă staționară; desigur, face excepție cazul regimului tranzitoriu. De aceea, cîmpul electric al curenților continui este numit *cîmp staționar*. Am spus că repartiția purtătorilor de sarcină este staționară, deoarece conform legii conservării sarcinii electrice, sarcina electrică ce intră într-un element de volum al conductorului, într-un anumit interval de timp, trebuie să fie egală cu sarcina electrică ce iese în același interval de timp din elementul de volum. De aceea, cîmpul electric al curenților continui este identic cu cîmpul electric al purtătorilor de sarcină imobili cu repartizare analoagă. Așa cum am arătat la momentul oportun, cîmpul electric staționar se deosebește de cîmpul electrostatic. Deosebirea constă în aceea că în timp ce în cîmpul electric staționar repartiția purtătorilor este staționară, purtătorii fiind mobili, în cîmpul electrostatic purtătorii de sarcini electrice sînt imobili, iar sarcina electrică este în echilibru electrostatic. Dacă în cîmpul curenților continui distribuția purtătorilor de sarcină nu ar fi staționară, atunci intensitatea cîmpului ar fi variabilă, iar curentul electric nu ar mai fi continuu. Ca și cîmpul electrostatic, cîmpul electric al curenților continui este un *cîmp potențial*; liniile de curent, însă, sînt curbe închise, spre deosebire de liniile de cîmp ale cîmpului electrostatic, care sînt curbe deschise. Dacă liniile de curent nu ar fi închise, ar însemna că în locul unde începe curentul electric, cu timpul, s-ar acumula purtători de sarcină electrică (electroni), iar în locul unde se termină ar dispare, cu timpul, purtătorii de sarcină.

Din același motiv, prin diferite secțiuni transversale ale unui conductor, în lipsa ramificațiilor între secțiuni, curentul electric trebuie să aibă aceeași intensitate. Să considerăm

rețeaua din figura 88 și să presupunem că prin conductoare intensitatea curentului electric este constantă în timp (tensiunea constantă); în mediul izolant ce înconjoară conductoarele parcurse de curenți, cîmpul electric este și el constant în timp și, ca urmare, în mediul respectiv curentul electric de deplasare este nul. În concluzie, putem afirma că, trebuie

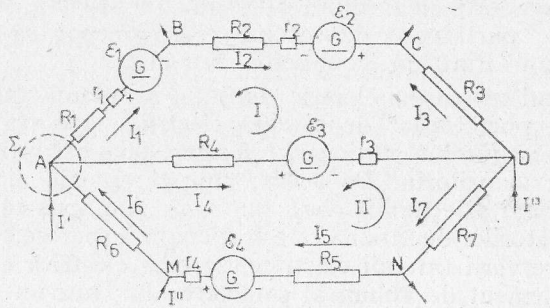



Fig. 88. Pentru deducerea legilor lui Kirchhoff.

să luăm în considerare numai curenții electrici din conductoare. Fie acum nodul $A$, pe care-l vom presupune în interiorul unei suprafețe închise $\Sigma$ și, aplicînd relația (137), vom scrie

$$\oint_{\Sigma} \vec{j}\, d\vec{S} = \sum_{k=1}^{k=n} I_k = 0. \qquad (138)$$

În expresia (138) $I_k$ sînt curenții care converg și, respectiv, diverg către (respectiv dinspre) nodul considerat ($A$). Ecuația (138) exprimă *prima lege a lui Kirchhoff* și se formulează în modul următor: *suma algebrică a curenților într-un nod al unei rețele este egală cu zero.* Se consideră pozitivi curenții care intră în nod și negativi curenții care ies din nod.

Faptul că distribuția purtătorilor de sarcină este staționară, așa cum am arătat mai sus, ne spune că în fiecare punct al unei ramificații, dintr-un circuit electric, trebuie să fie satisfăcută legea I a lui Kirchhoff; dacă nu ar fi așa, atunci în punctul respectiv ar trebui să se acumuleze purtători de sarcină electrică.

A doua lege stabilește legătura dintre tensiunile electromotoare ale generatoarelor din laturile unei bucle și căderile



de tensiune produse în receptoare și în sursele de curent. Referindu-ne la figura 88, vom aplica legea lui Ohm pentru fiecare porțiune de circuit și vom scrie ecuațiile pentru fiecare latură. Pentru aceasta se alege mai întîi un sens arbitrar de parcurgere a unei bucle (ochi) oarecare de rețea; în cazul de față vom considera bucla $I$ și sensul trigonometric; apoi scriem legea lui Ohm pentru fiecare porțiune de circuit și însumînd avem ecuația pentru o latură respectînd următoarea regulă: dacă prin rezistor curentul are același sens cu sensul de parcurgere a circuitului (sens ales arbitrar), atunci produsele de forma $RI$ sînt pozitive, iar în cazul generatoarelor tensiunile electromotoare $\mathcal{E}$ se iau cu semnul plus atunci cînd sensul ales de noi de parcurgere a circuitului corespunde cu sensul curentului în interiorul generatoarelor, de la polul negativ la polul pozitiv. Și acum să aplicăm cele spuse buclei $I$ scriind direct ecuațiile pentru fiecare latură. Vom avea

$$\begin{aligned} V_B - V_A + \mathcal{E}_1 &= -(R_1 + r_1)I_1 \\ V_A - V_D - \mathcal{E}_3 &= (R_4 + r_3)I_4 \\ V_D - V_C &= R_3 I_3 \\ V_C - V_B - \mathcal{E}_2 &= -(R_2 + r_2)I_2 \end{aligned}$$

Însumînd membru cu membru avem

$$\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_3 = -(R_1+r_1)I_1 - (R_2+r_2)I_2 + R_3 I_3 + (R_4 + r_3)I_4$$

sau, în general,

$$\sum_{k=1}^{n} \mathcal{E}_k = \sum_{k=1}^{n} R_k I_k. \qquad (139)$$

Conchidem că într-o buclă a unei rețele electrice *suma tensiunilor electromotoare este egală cu suma căderilor de tensiune.* Acest adevăr reprezintă conținutul celei de a *doua legi a lui Kirchhoff.* În cazul particular în care într-o buclă nu există surse

$$\sum_{k=1}^{n} \mathcal{E}_k = 0 \text{ și relația (139) devine: } \sum_{k=1}^{n} R_k I_k = 0.$$

Relațiile (138) și 139) reprezintă cele două sisteme de ecuații ale lui Kirchhoff care se pot scrie pentru orice rețea electrică. Pentru a ști cîte ecuații de tipul (138) și

cîte de tipul (139) se scriu atunci cînd trebuie rezolvată o rețea, se procedează astfel: se notează numărul nodurilor cu $p$ și numărul laturilor cu $l$. Apoi se scrie

$$n_1 = p - 1$$

ecuații de tipul (138) și

$$n_2 = l - p + 1$$

ecuații de tipul (139) și apoi se rezolvă după metodele matematice cunoscute. Numărul total de ecuații va fi, evident

$$n_1 + n_2 = l$$

adică egal cu numărul laturilor buclei considerate.

În mod obișnuit, curenții electrici din laturi reprezintă necunoscutele. Dar, sînt situații în care drept necunoscute pot figura unele dintre t.e.m. sau unele rezistențe. De aceea, este necesar ca pe lîngă ecuațiile lui Kirchhoff să se scrie și alte ecuații suplimentare. În final numărul total de ecuații trebuie să fie egal cu numărul necunoscutelor.

Ne dăm seama că se pot scrie atîtea ecuații de tipul legii întîi cîte noduri sînt, deci $n_1 = p$ ecuații. Dar dintre acestea numai $p - 1$ ecuații sînt independente.

La fel vom constata că se pot scrie mai mult decît $n_2$ ecuații de tipul legii a doua, adică se pot scrie atîtea ecuații cîte bucle se pot combina cu cele $l$ laturi ale rețelei, însă dintre acestea numai $n_2$ ecuații sînt independente (celelalte, peste $n_2$, rezultă dintr-o combinare liniară a celor $n_2$ ecuații).

Atunci cînd se scriu ecuațiile trebuie să se atribuie necunoscutelor (curenți sau t.e.m.) sensuri arbitrare, care pe scheme se reprezintă prin săgeți. Sensurile atribuite corespund semnelor convenționale pozitive ale mărimilor ce reprezintă necunoscutele.

După rezolvarea sistemului de ecuații scrise se vor obține rezultate în care necunoscutele pot fi cu semnul + sau cu semnul —. Cele care au semnul + confirmă ca fiind corect sensul ales arbitrar, cele care au semnul — ne spun că sensul real al necunoscutelor este invers față de sensul ales arbitrar; dar valoarea lor absolută este aceea obținută din rezolvarea sistemului.

Gustav Robert *Kirchhoff* (1824—1887), fizician german. A fost profesor la Universitatea din Heidelberg și la Universitatea din Berlin. Kirchhoff are contribuții însemnate în electricitate, optică, spectroscopie, elasticitate.



**Gustav Robert Kirchhoff**

În electricitate, plecînd de la legea lui Ohm, descoperită în anul 1827 și de la legea conservării sarcinii electrice, stabilește în anul 1847 legile care-i poartă numele. (Unii autori le numesc teoreme. Totuși, fizicieni de mare prestigiu, ca R. Feynman, laureat al premiului Nobel, le numește legi.)

În anul 1859 publică o lucrare intitulată „Despre liniile lui Fraunhofer" în care explică originea liniilor negre ce brăzdează spectrul Soarelui și care au fost descoperite de către Fraunhofer. În anul 1860 a descoperit elementul *cesiu* și, împreună cu Bunsen, a descoperit, în 1861, elementul *rubidiu*. Tot împreună cu Bunsen, Kirchhoff publică, în anul 1861, o lucrare purtînd titlul „Analiza chimică cu ajutorul spectrelor", în care pune bazele analizei spectrale. Printre altele arată că substanțele extraterestre se compun din aceleași elemente chimice ca și cele de pe Pămînt (o previziune a unității materiale a luminii). [Robert Bunsen (1811—1890) a fost profesor și coleg cu Kirchhoff la Universitatea din Heidelberg.]

În anul 1882, Kirchhoff dă o altă formulare principiului Huygens-Fresnel, prin care înlătură unele neajunsuri din formularea lui Fresnel. Cu un an înainte, însă (1881), stabilește o lege deosebit de importantă în optică, lege care-i poartă numele și care se referă la radiația termică de echilibru.

Gruparea generatoarelor electrice constituie aplicații ale legilor lui Kirchhoff. Să considerăm schema din figura 89 și să aplicăm legea a doua a lui Kirchhoff (139). Vom avea:

$$RI + \frac{I}{m} nR = n\mathcal{E}$$

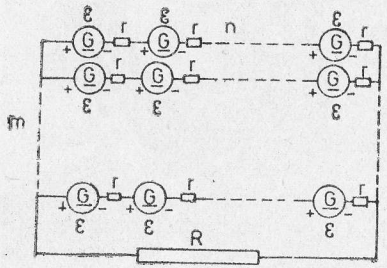



Fig. 89. Gruparea generatoarelor ca aplicație a legilor lui Kirchhoff.

de unde

$$I = \frac{n\mathcal{E}}{R + \frac{n}{m} r}. \qquad (140)$$

Dacă $n = 1$, (140) devine

$$I_p = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{1}{m} r}; \qquad (141)$$

este cazul grupării a $m$ generatoare numai în paralel.

În cazul că $n$ generatoare sînt grupate numai în serie, $m = 1$ și (140) devine

$$I_s = \frac{n\mathcal{E}}{R + nr}. \qquad (142)$$

Gruparea inițială este, așa cum se vede, o grupare mixtă de generatoare electrice. Alegerea grupării depinde de cerințe. De exemplu, în cazul cînd rezistența exterioară este mult mai mică decît rezistența interioară ($R \ll r$) relațiile (141) și (142) devin

$$I_p = \frac{m\mathcal{E}}{r} \quad \text{și} \quad I_s = \frac{\mathcal{E}}{r}.$$



Se observă că $I_p > I_s$ sau că $I_p = mI_s$. Prin urmare, cînd rezistența exterioară este mult mai mică decît rezistența interioară a bateriei, legarea în paralel ne dă posibilitatea să obținem un curent mai mare decît în cazul cînd generatoarele ar fi legate în serie. Se mai observă că, dacă generatoarele sînt legate în serie, curentul debitat are aceeași valoare ca și cînd ar exista un singur generator.

Dacă $R \gg r$, atunci

$$I_p = \frac{\mathcal{E}}{R} \quad \text{și} \quad I_s = \frac{n\mathcal{E}}{R}.$$

În aceste condiții

$$I_s > I_p \quad \text{sau} \quad I_s = nI_p.$$

Legarea în serie este mai avantajoasă.

În fine, pentru $R = r$ ambele grupări sînt convenabile.

*Gruparea rezistoarelor* în diferite moduri constituie, de asemenea, aplicații ale legilor lui Kirchhoff.

a) *Gruparea în paralel.* Două sau mai multe rezistoare sînt legate în paralel dacă au aceeași cădere de tensiune la borne. (Nu e vorba de căderi de tensiune egale!) Să considerăm $m$ rezistoare în paralel (fig. 90, a) și să aplicăm în punctul $A$ legea întîi a lui Kirchhoff. Vom scrie

$$I = \sum_{k=1}^{n} I_k$$

sau

$$\frac{U}{R} = \sum_{k=1}^{m} \frac{U}{R_k}$$

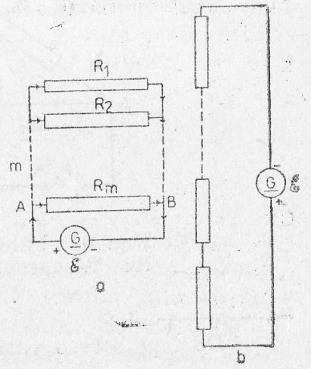



Fig. 90. Gruparea rezistoarelor ca aplicație a legilor lui Kirchhoff: a — în paralel, b — în serie.

și de aici

$$\frac{1}{R} = \sum_{k=1}^{m} \frac{1}{R_k}.$$

Cum $\frac{1}{R} = G$, vom avea în final

$$G = \sum_{k=1}^{m} G_k.$$

b) *Gruparea în serie.* Dacă $n$ rezistoare sînt grupate în serie atunci se scrie (fig. 90, b)

$$U = \sum_{k=1}^{n} U_k$$

sau

$$RI = \sum_{k=1}^{n} R_k I$$

și

$$R = \sum_{k=1}^{n} R_k.$$

O altă aplicație importantă o constituie *puntea Wheatstone*[1]. Schema punții Wheatstone este arătată în figura 91 și reprezintă un circuit care începe de la generatorul $G$; în $A$ și $C$ curentul se ramifică, iar în $D$ și $B$ curenții se

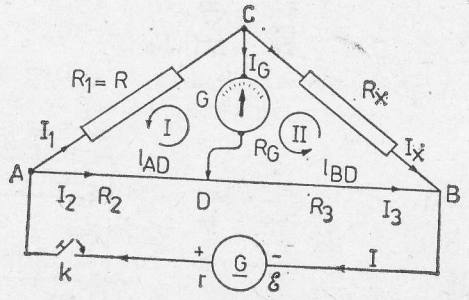



Fig. 91. Puntea cu fir (variantă a punții lui Wheatstone) ca aplicație a legilor lui Kirchhoff.

[1] De fapt este o variantă a acesteia.



unesc și ajung la generator. Între $A$ și $B$ este un fir metalic omogen foarte bine calibrat și întins. $R_x$ este un rezistor a cărui rezistență electrică este necunoscută, iar $R$ un rezistor a cărui rezistență se cunoaște. Între $C$ și $D$ este un galvanometru; de la galvanometru pleacă un conductor la un cursor mobil $D$. În timpul experienței se mută cursorul pe fir pînă cînd acul instrumentului ajunge la zero. În acel moment se citesc lungimile $AD$ și $DB$ ale firului pe rigla pe care este întins. În aceste condiții avem relația

$$R_x = \frac{l_{BD}}{l_{AD}} R_1$$

care se obține astfel: în buclele $I$ și $II$ se aplică legea a doua a lui Kirchhoff

$$(I) \qquad -I_1R_1 + I_2R_2 - I_GR_G = 0$$

$$(II) \qquad I_2R_3 - I_xR_x + I_GR_G = 0.$$

În momentul în care galvanometrul nu indică prezența unui curent, $I_G = 0$ și relațiile devin

$$I_1R_1 = I_2R_2$$
$$I_3R_3 = I_xR_x$$

sau

$$\frac{R_2}{R_3} = \frac{R_1}{R_x}, \text{ deoarece } I_1 = I_x \text{ și } I_2 = I_3$$

sau încă

$$\frac{R_1}{R_x} = \frac{\frac{l_{AD}}{S}}{\frac{l_{BD}}{S}}$$

de unde rezultă relația dată inițial.

Așadar, puntea Wheatstone permite a se compara o rezistență necunoscută cu alta cunoscută și obținerea valorii rezistenței necunoscute. Este o metodă simplă folosită în unele laboratoare, mai ales în acele școlare. Schema dată în figura 91 este cunoscută în laboratoare, mai ales sub denumirea *puntea cu fir*.

În încheiere, vom arăta cum se poate obține legea a doua a lui Kirchhoff pe baza principiului întîi al termodinamicii, sistemul fizic fiind, în cazul de față, alcătuit din purtătorii de sarcină electrică; asupra acestui sistem se efectuează lucrul mecanic

$$L = q\mathcal{E}$$

pentru deplasarea purtătorilor în circuitul electric. Însă, datorită faptului că sistemul cedează căldură, vom scrie

$$Q = (R + r)I^2t$$

și cum $L = Q$, rezultă

$$RI + rI = \mathcal{E},$$

deci legea a doua, sub formă mai simplă decît aceea dată, mai înainte (139). Se observă că din ultima relație rezultă și formula (133).

## LEGEA LUI LAPLACE

Fiecare dintre noi cunoaștem faptul că în jurul conductoarelor parcurse de curenți electrici se generează un cîmp magnetic. Practic, aceste conductoare au cele mai variate forme și deseori este necesar a se calcula inducția magnetică $\vec{B}$ într-un punct oarecare din jurul lor și în funcție de aceasta alte mărimi fizice utile. În acest scop, Laplace a dat o formulă generală, care exprimă *legea* ce-i poartă numele și a cărei formă este

$$d\vec{B} = k\mu \frac{I}{r^3}(d\vec{l} \times \vec{r}) \qquad (143)$$

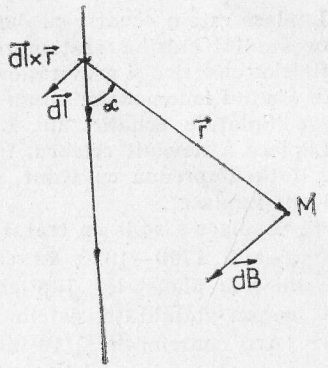
sau scalar

$$dB = k\mu \frac{I}{r^2} \sin (\widehat{d\vec{l}, \vec{r}})\, dl. \qquad (144)$$

Așadar, inducția magnetică elementară $dB$, într-un punct la distanța $r$ față de un element de conductor, este direct



Fig. 92. Pentru ilustrarea legii lui Laplace.




proporțională cu $dl$, $I$, $\sin (\widehat{d\vec{l}, \vec{r}})$, $\mu$, și invers proporțională cu $r^2$. Factorul de proporționalitate este $k = \frac{1}{4\pi}$.

Nu putem înțelege aceste relații dacă nu facem apel la figura 92. Comentariul este de prisos. Vom vedea imediat cum se aplică practic.

Pierre Simon *Laplace* (1749–1827), matematician, astronom și fizician francez, membru al Academiei de Științe din Paris. În fizică, și anume în electromagnetism, pe lîngă legea care-i poartă numele, sînt cunoscute forța și ecuația Laplace. Ecuația

**Pierre Simon Laplace**

Laplace este o ecuație cu derivate parțiale de ordinul doi, folosită în studiul stărilor staționare de temperatură, în studiul potențialelor electrice și gravitaționale, în hidrodinamica fluidelor ideale, în studiul fenomenelor ce au loc în descărcările electrice prin gaze ș.a. Soluțiile ecuației lui Laplace se numesc funcții armonice. Laplace a devenit celebru, însă, prin teoria cosmogonică pe care a dat-o împreună cu Kant, cunoscută sub denumirea de „Teoria Kant-Laplace".

Laplace a scris un tratat de „mecanică cerească" în 5 volume, între anii 1799—1826, în care dezvoltă cercetările sale asupra Lunii și a planetelor Jupiter, Saturn, asupra cometelor, precum și asupra stabilității sistemului solar.

Are contribuții și în domeniul matematicii. Este cunoscut operatorul Laplace, folosit și în fizică ș.a.

Se știe că orice circuit prin care trece un curent electric nu poate fi decît închis; de aceea, considerarea unei porțiuni elementare pentru a calcula inducția într-un punct oarecare este lipsită de semnificație fizică. Așadar, legea lui Laplace este numai o expresie matematică, dar extrem de utilă.

Să arătăm cum, cu ajutorul acestei legi, se poate deduce expresia matematică a legii Biot-Savart. Pentru aceasta, se consideră un conductor filiform și un punct $M$ la distanța $r_\perp$ de axa conductorului, în care vrem să-l calculăm pe $B$. Vom considera porțiunea elementară $dl$ de conductor și cu ajutorul relației (144) și a figurii 93, avem succesiv

$$B = k\mu I \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin\alpha}{r^2}\, dl; \qquad (145)$$

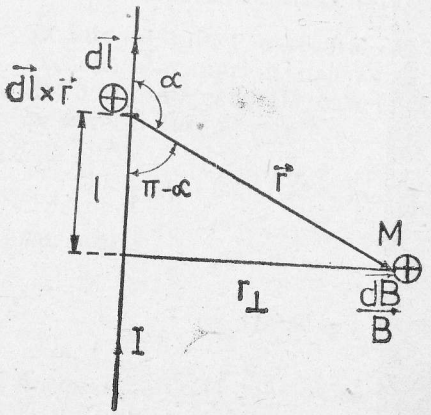



Fig. 93. Pentru deducerea legii Biot-Savart din legea lui Laplace.



însă

$$r_\perp = l\,\mathrm{tg}\,(\pi - \alpha) = -l\,\mathrm{tg}\,\alpha$$

și

$$l = r_\perp \,\mathrm{cotg}\,\alpha,$$

$$\text{iar } dl = \frac{r_\perp}{\sin^2\alpha}\, d\alpha;$$

cum

$$r_\perp = r\,\sin\alpha$$

rezultă

$$dl = \frac{r}{\sin\alpha}\, d\alpha \text{ și } \frac{dl}{r^2} = \frac{d\alpha}{r\,\sin\alpha} = \frac{d\alpha}{r_\perp}. \qquad (146)$$

Substituind acum pe (146) în (145) obținem

$$B = \frac{k\mu I}{r_\perp}\int_0^\pi \sin\alpha\, d\alpha$$

de unde

$$B = 2k\mu\,\frac{I}{r}. \qquad (147)$$

Aceasta este *legea Biot-Savart*; ea a fost descoperită, însă, experimental. Așa fiind, de ce apare cifra 2, s-au întrebat fizicienii? S-au dat două explicații posibile: pentru a fi de acord cu rezultatul din legea lui Laplace, sau pentru că piciorul perpendicularei $r_\perp$ împarte conductorul în două părți egale (conductorul este infinit de lung). Dacă în locul unui singur conductor se folosește un fascicul cuprinzînd $n$ conductoare, expresia (147) se scrie

$$B = 2k\mu\,\frac{nI}{r}.$$

Legea Biot-Savart este limitată, ea fiind valabilă numai pentru conductoare rectilinii și infinit de lungi (conductoare filiforme), adică pentru conductoare ale căror dimensiuni transversale sînt neglijabile în comparație cu lungimea lor. De exemplu, un conductor cu diametrul de 0,5 mm și cu lungimea de 1 m poate fi considerat filiform.

Cu ajutorul legii lui Laplace se poate calcula cu ușurință, de exemplu, inducția magnetică în centrul unei spire circulare, într-un punct de pe axa spirei sau într-un punct de pe axa unui solenoid, într-un punct în interiorul unui conductor ș.a.m.d. Oricare ar fi forma conductorului, el poate

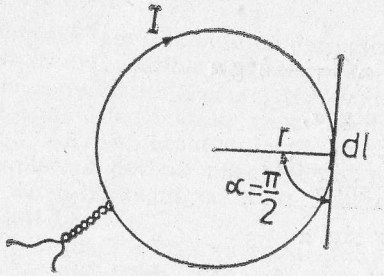



Fig. 94. Inducția magnetică în centrul unei spire circulare.

fi împărțit în porțiuni elementare $dl$ și după ce se calculează inducția elementară $dB$, se obține apoi $B$, prin integrare.

Și acum, ca o altă aplicație a legii lui Laplace, vom arăta, cum se poate obține expresia matematică a inducției magnetice în centrul unei spire circulare străbătute de un curent electric $I$. În acest caz, unghiul $\alpha$ (dintre $d\vec{l}$ și $\vec{r}$) este egal cu 90° (fig. 94). Ținînd seama de aceasta, expresia (144) devine

$$dB = k\mu \frac{I}{r^2} dl. \qquad (148)$$

Cum $dl$ este variabil, iar celelalte mărimi din membrul al doilea al relației (148) sînt constante, vom scrie

$$B = k\mu \frac{I}{r^2} \int_0^{2\pi r} dl = k\mu \frac{I}{r^2} \, l \Big|_0^{2\pi r}$$

sau

$$B = 2k\pi\mu \frac{I}{r}. \qquad (149)$$

Expresia (149) servește la calcularea inducției magnetice în centrul unei spire circulare prin care trece un curent electric de intensitate $I$. Dacă sînt $N$ spire circulare alipite formînd un cadru, atunci (149) devine

$$B = 2k\pi\mu \frac{NI}{r}.$$

Tot ca aplicație a legii lui Laplace să arătăm cum se obține formula de calcul a inducției magnetice într-un



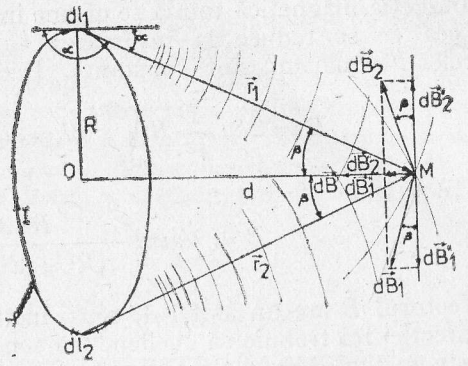



Fig. 95. Inducția magnetică într-un punct pe axa unei spire circulare.

punct de pe axa unei spire circulare străbătute de un curent electric $I$. În acest scop vom considera o spiră circulară de rază $R$, prin care trece un curent $I$ și un punct $M$ situat pe axa spirei la distanța $d$ față de planul spirei (fig. 95). Inducția magnetică în punctul $M$ este

$$dB = (dB_1 + dB_2) \sin \beta = 2 \, dB_1 \sin \beta$$

deoarece $dB_1 = dB_2$;
dar

$$dB_1 = k\mu \frac{I}{r_1^2} dl_1$$

și

$$dB_2 = k\mu \frac{I}{r_2^2} dl_2.$$

Cum însă, $dl_1 = dl_2 = dl$ și $r_1 = r_2 = r$, rezultă

$$dB = 2k\mu \frac{I}{r^2} dl \sin \beta. \qquad (150)$$

Însă $\sin \beta = \frac{R}{r}$ și deci relația (150) se scrie

$$dB = 2k\mu \frac{I}{r^2} R dl.$$

Inducția magnetică totală se obține însumînd cantitățile $dB$, ceea ce se reduce la însumarea cantităților $dl$, deoarece celelalte mărimi sînt constante. Deci, vom scrie

$$B = 2k\mu \frac{I}{r^3} R \int_0^{\pi R} dl = 2k\mu\pi R^2 \frac{I}{r^3}$$

sau

$$B = 2k\mu\pi I \frac{R^2}{(R^2 + d^2)^{3/2}}. \qquad (151)$$

Vectorul $\vec{B}$ are un astfel de sens, încît uitîndu-ne în lungul direcției lui trebuie să „vedem" că sensul curentului în spiră este în sensul orar. Se observă că pentru $d=0$, relația (151) devine

$$B = 2k\mu\pi \frac{I}{R}.$$

Dacă $d \gg R$, atunci din (151) rezultă

$$B = 2k\mu\pi \frac{I}{d^3} R^2.$$

Jean Baptiste *Biot* (1774—1862), fizician, astronom și geodez francez, membru al Academiei de Științe din Paris, a avut contribuții în multe domenii ale fizicii. De exemplu, cercetînd fenomenul rotirii planului de polarizare al luminii, la trecerea acesteia prin soluții, a stabilit o lege care dă unghiul de rotire a planului de polarizare în funcție de concentrația soluției și de grosimea stratului de soluție străbătut de lumină. El a pus bazele zaharimetriei.

Biot are contribuții și în mecanica cerească. Tot el a studiat proprietățile fizice ale gazelor, iar împreună cu Felix Savart (1791—1841) a dat, în electromagnetism, legea ce le poartă numele.

Biot, împreună cu Gay-Lussac, a făcut primul zbor cu balonul în scopuri științifice, iar împreună cu Arago a studiat o serie de probleme de geodezie și unele de fizică. Împreună cu Thénard a studiat probleme de chimie, iar cu Melloni căldura radiantă ș.a.m.d. Reiese de aici că Biot nu era un savant care să lucreze izolat.

În anul 1803, cînd a fost ales membru al Academiei de Științe, el avea deja o bogată contribuție în domeniul științelor.

În privința lui Biot ca om, se citează următoarea întîmplare petrecută la Paris în anul 1801. În acest an, într-o ședință a



Academiei de Științe din Paris, Volta și-a expus teoria sa asupra electricității, prezentînd și o experiență cu pila electrică („pile" din limba franceză înseamnă *teanc*). La această ședință a asistat și Napoleon Bonaparte. S-a propus în ședință să i se acorde lui Volta o medalie de aur, iar Biot care a întocmit raportul Comisiei Academiei a propus să i se atribuie și o sumă mare de bani pentru cercetări. Surprinzător este faptul că Biot deși nu era întrutotul de acord cu concluziile lui Volta, a susținut propunerea și Volta a primit suma respectivă.

## LEGEA INDUCȚIEI ELECTROMAGNETICE

Aceasta constituie una din legile fundamentale ale electromagnetismului. Grație fenomenului de inducție electromagnetică beneficiem de multe din cele ce alcătuiesc confortul, viața noastră modernă. Este suficient să ne gîndim la iluminatul electric, la bobina de inducție folosită în instalația de aprindere a motoarelor de pe autoturisme; autocamioane, autobuze etc., pentru a ne da seama de marea însemnătate a acestei legi. În același timp, expresia matematică a legii inducției electromagnetice reprezintă cea de a doua ecuație în sistemul de ecuații care stau la baza teoriei electromagnetice a lui Maxwell. În cele ce urmează, vom insista asupra părții fenomenologice a legii.

Fie o bobină (fig. 96), ale cărei capete sînt legate la un galvanometru $G$ sau un miliampermetru cu zeroul scalei

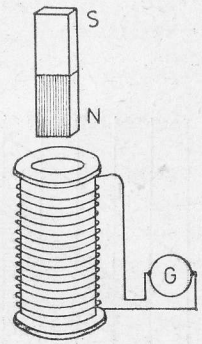



Fig. 96. Pentru punerea în evidență a fenomenului de inducție electromagnetică.

la mijlocul acesteia, pentru a se putea observa deviații ale acului în două sensuri. În bobină introducem un magnet permanent (indiferent care pol) și privim la galvanometru. Vom observa că acul deviază într-un anumit sens. Cînd extragem magnetul observăm că acul deviază în sens opus cu primul caz. Cînd magnetul este în repaus, în interiorul bobinei acul instrumentului se menține la zero. Această experiență ne spune că la introducerea sau la extragerea magnetului din bobină, prin suprafața limitată de spirele acesteia se produce o variație de flux magnetic ($d\Phi = \vec{B}d\vec{S}$) și, ca urmare, în spire se induce o *tensiune electromotoare de inducție* $\mathcal{E}_i$, care determină un curent electric numit *curent de inducție*, ce trece prin spirele bobinei și este pus în evidență de instrumentul de măsură. Dacă se menține magnetul fix și se deplasează bobina astfel ca magnetul să intre în bobină sau să iasă din bobină, se va face aceeași constatare ca în experiența precedentă. Se mai observă, privind instrumentul de măsură, că variațiile sînt mai mari atunci cînd viteza relativă de deplasare a magnetului sau a bobinei este mai mare. În locul magnetului permanent se poate folosi un electromagnet.

Fie acum un conductor rectiliniu cu lungimea $l$, pe care-l deplasăm cu viteza $\vec{v}$ într-un cîmp magnetic (de inducție) $\vec{B}$ (fig. 97). Odată cu deplasarea conductorului se mișcă și purtătorii de sarcină mobili (electronii), pe aceeași direcție și în același sens cu aceeași viteză $\vec{v}$. Dar, aflîndu-se în cîmpul magnetic, purtătorii de sarcină vor fi supuși unei forțe, denumită *forță Lorentz*, a cărei expresie matematică este

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}).$$

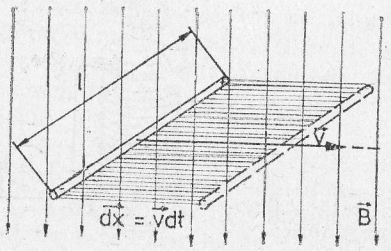



Fig. 97. Pentru deducerea legii inducției electromagnetice.



Ca urmare, va avea loc o separare de sarcini electrice: la o extremitate a conductorului va exista un exces de sarcini electrice negative, iar la extremitatea opusă un exces de sarcini electrice pozitive[1]. Se poate considera că separarea sarcinilor electrice este produsă de un cîmp electric indus $\vec{E}_{ind}$ a cărui valoare trebuie să fie

$$\vec{E}_{ind} = \vec{v} \times \vec{B}. \tag{152}$$

Tensiunea corespunzătoare acestui cîmp se numește *tensiune electromotoare de inducție* și sub acțiunea ei se produce separarea sarcinilor electrice. Dar, prin separarea sarcinilor electrice ia naștere, în conductor, un cîmp electric coulombian, a cărui intensitate crește cu cît numărul sarcinilor separate se mărește. Asupra purtătorilor de sarcină cîmpul coulombian acționează cu o forță al cărei sens este contrar sensului forței datorită cîmpului indus. Însă, la un moment dat, cele două forțe devin egale și, din această cauză, separarea sarcinilor electrice încetează. Tensiunea electromotoare de inducție la capetele conductorului poate fi scrisă, ținînd seama de (152),

$$\mathcal{E}_i = \int_a^b (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}. \tag{153}$$

Însă

$$\vec{v} = \frac{d\vec{x}}{dt}; \tag{154}$$

unde $d\vec{x}$ reprezintă deplasarea conductorului.
Substituind pe (154) în (153) se obține

$$\mathcal{E}_i = \int_a^b \left(\frac{d\vec{x}}{dt} \times \vec{B}\right) \cdot d\vec{l}. \tag{155}$$

Permutăm acum factorii produsului mixt[2] și notăm produsul $d\vec{l} \times d\vec{x}$ cu $\vec{n}dS = d\vec{S}$, care reprezintă elementul

[1] Desigur, cititorii își amintesc că în conductoare metalice, sarcinile pozitive nu se pot deplasa.

[2] Conform formulei: $\vec{V}_1 \cdot (\vec{V}_2 \times \vec{V}_3) = \vec{V}_3 \cdot (\vec{V}_1 \times \vec{V}_2) = \vec{V}_2 \cdot (\vec{V}_3 \times \vec{V}_1)$. Acest produs mixt este un scalar și reprezintă volumul paralelipipedului construit pe cei trei vectori: $\vec{V}_1$, $\vec{V}_2$, $\vec{V}_3$. De asemenea, $\vec{V}_1 \cdot (\vec{V}_2 \times \vec{V}_3) = -\vec{V}_2 \cdot (\vec{V}_1 \times \vec{V}_3)$.

de arie orientată, $dS$ fiind aria elementară descrisă (măturată) de elementul de conductor $d\vec{l}$ cînd se deplasează pe distanța $d\vec{x}$. Cu acestea, relația (155) devine

$$\mathcal{E}_i = \int_a^b \vec{B} \cdot \frac{\vec{n}dS}{dt} = \frac{}{dt} \int_a^b \vec{B}\vec{n}dS \qquad (156)$$

sau, ținînd seama că $\Phi = \int_S \vec{B}d\vec{S}$, rezultă

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \qquad (157)$$

În relațiile (156) și (157) $d\varphi = \vec{B}\cdot\vec{n}dS$ reprezintă fluxul magnetic prin suprafața descrisă (măturată) de conductor în mișcarea sa. Relația (157) ne spune că tensiunea electromotoare indusă este egală cu viteza de variație a fluxului magnetic luată cu semnul minus. Semnul minus ne spune că fenomenul decurge în acord cu legea lui Lenz[1]. Fenomenul inducției electromagnetice a fost descoperit de către fizicianul englez Faraday (vezi p. 382) în anul 1831. În expresia (156) $\frac{d}{dt}$ a putut fi scos în afara semnului de integrare, deoarece integrarea se face în raport cu lungimea conductorului, care nu variază în timp.

În concluzie, așa cum arată experiența, atunci cînd o spiră (un contur) înlănțuie un cîmp magnetic variabil în timp, în spiră ia naștere o tensiune electromotoare de inducție, dată de formula (157), chiar dacă spira este imobilă. Formula (157) exprimă *legea inducției electromagnetice*, denumită și *legea Faraday-Maxwell*. Această lege este valabilă pentru orice contur închis, care nu trebuie să fie neapărat conductor. Mai mult, acest contur poate fi numai închipuit, situat total sau parțial într-un mediu izolant. Important de reținut este faptul că în toate aceste cazuri, fără excepție, atunci cînd o suprafață limitată de orice

[1] Lege privind sensul curentului indus într-un circuit, potrivit căreia acesta are un astfel de sens încît prin fluxul magnetic creat de curent se poate opune variației fluxului magnetic inductor. Astfel, curentul indus se opune cauzei care îl produce.



contur este străbătută de un cîmp magnetic variabil în timp, în conturul respectiv se induce o tensiune electromotoare de inducție (t.e.m.i.), care determină un curent electric numit *curent* (electric) *de inducție*. Expresia (152) dovedește că în același spațiu în care există un cîmp magnetic variabil în timp, apare un cîmp electric legat de cîmpul magnetic, iar tensiunea electrică de-a lungul oricărui contur închis este egal cu t.e.m. de inducție din acest contur.

Datorită acestei largi interpretări, relația (157) reprezintă una dintre ecuațiile fundamentale ale cîmpului electromagnetic și se mai scrie sub forma

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}. \qquad (158)$$

Generalizarea legii inducției electromagnetice a fost dată de către Maxwell, sub forma: *în toate punctele din spațiu în care se află un cîmp magnetic ce variază în timp, apare întotdeauna un cîmp electric, fie că există sau nu, în el, un conductor.*

În expresia (157) sau (158), semnul minus arată că sensul tensiunii electromotoare de inducție este conform legii lui Lenz (adică în funcție de sensul de variație a fluxului magnetic), lege care afirmă: *cîmpurile, curenții sau forțele care iau naștere prin fenomene de inducție se opun cauzelor care le produc.* De pildă, în fenomenul de inducție descris cu ajutorul experienței din figura 97, apare, prin separarea purtătorilor de sarcină electrică, un cîmp electric care se opune cîmpului imprimat și deci separării, mai departe, a purtătorilor de sarcină electrică.

Fenomenul inducției electromagnetice, respectiv legea fundamentală a fenomenului, este unul (una) din cele mai importante fenomene (legi) în studiul electromagnetismului, precum și în aplicațiile practice ale acestuia: funcționarea generatoarelor electrice și funcționarea transformatoarelor. În cazul transformatoarelor, legea fundamentală a fenomenului de inducție electromagnetică se folosește sub forma

$$\mathcal{E}_i = -N\frac{d\Phi}{dt}$$

unde $N$ este numărul de spire al înfășurării primare sau al înfășurării secundare.

Vom descrie acum, succint, un fenomen de inducție electromagnetică, mai deosebit și mai puțin cunoscut, des-

coperit de ilustrul fizician român Ștefan Procopiu, în timp ce studia efectele magnetice care apar la trecerea curentului alternativ prin conductoare de metal feromagnetic. Fenomenul, nou descoperit, necunoscut pînă atunci pe plan mondial, a primit, ulterior, denumirea descoperitorului său, fiind cunoscut în literatura universală sub denumirea de *„efectul Procopiu"*. Efectul Procopiu constă în apariția unei tensiuni electromotoare de inducție în spirele unei bobine plasată într-un cîmp magnetic uniform și constant, de mică intensitate, ale cărui linii de cîmp sînt paralele cu axa bobinei, cînd prin firul coaxial, bine întins, trece un curent electric alternativ.

Apariția tensiunii electromotoare are loc numai în prezența cîmpului magnetic, uniform și constant, generat de o bobină cu diametru mai mare conectată la o sursă de tensiune continuă (un acumulator electric), coaxială cu bobina, cu diametru mai mic, în care se induce tensiunea electromotoare și care este conectată la un voltmetru electronic[1], pe direcția axei comune a bobinelor aflîndu-se firul din substanță feromagnetică. Cîmpul magnetic generat de bobina cu diametru mai mare menține un același sens al curentului electric de inducție.

Ulterior, Ștefan Procopiu a publicat alte 15 lucrări în legătură cu acest fenomen, dînd și o teorie a magnetizării fierului, teorie verificată de alți cercetători.

De efectul Procopiu s-au ocupat, în anii care au urmat descoperirii (1930), unii cercetători între care R. Skorski și A. Duracz[2], și A. Kaufmann[3]. Primii au studiat efectul Procopiu, iar ultimul, cercetînd efectul, a descoperit un nou fenomen electrodinamic bazat pe efectul Procopiu. Kaufmann este acela care, în anul 1967, demonstrează că efectul Procopiu poate fi utilizat în construcția unor memorii cu conductor feromagnetic, pe care le și realizează experimental, folosite în componența unor mașini electronice de calcul. Kaufmann scrie: „... Conceptul memoriei este fundamentat pe descoperirea recentă a unui fenomen nou, electrodinamic, avînd la bază «fenomenul Procopiu»"[4].

[1] În experiențele mai recente se folosește voltmetrul electronic.
[2] J. Appl. Phys., vol. 36, p. 511—513, februarie, 1965.
[3] J. Appl. Phys., vol. 36, p. 3 928—3 930, decembrie 1965.
[4] I.E.E.I. Transaction on Electronic Computers, vol. 16, nr. 1, p. 86—88, februarie 1967.



Ștefan *Procopiu* s-a născut în anul 1890 în orașul Bîrlad unde a absolvit și liceul, iar în anul 1912 își ia licența în Științe la Universitatea din Iași și doctoratul în fizică la Universitatea din Paris, în anul 1924, sub îndrumarea profesorului A. Cotton. A fost profesor la Facultatea de fizică a Universității A.I. Cuza din Iași și membru activ al Academiei Republicii Socialiste România, om de știință emerit și profesor emerit al Republicii Socialiste România. A creat „Școala de cercetări fizice experimentale" la Facultatea de fizică a Universității din Iași. Contribuțiile sale în fizică sînt numeroase. Astfel, pe cînd era student în ultimul an a calculat pentru prima dată valoarea magnetonului[1] denumit astăzi *magneton Bohr-Procopiu*, deoarece Bohr îl calculează după cîteva luni (în 1913). Dacă s-ar fi respectat prioritatea ar fi trebuit să fie denumit *magneton Procopiu*.

Studiind birefringența în cîmp electric și birefringența în cîmp magnetic a soluțiilor coloidale și a suspensiilor cristaline a descoperit că numai suspensiile de substanță birefringentă prezintă fenomenul de anizotropie și că la suspensiile coloidale birefringența se datorește anizotropiei moleculelor. De asemenea, a stabilit că birefringența electrică este dată de toate suspensiile metalice, iar cea magnetică este dată de suspensiile de metale

**Ștefan Procopiu**

[1] Momentul magnetic al electronului.

feromagnetice. Cu acest prilej a descoperit fenomenul de „depolarizarea longitudinală a luminii de către soluțiile coloidale și suspensiile cristaline", în anul 1921, fenomen cunoscut în literatura de specialitate sub denumirea de *„fenomenul Procopiu"*. Ștefan Procopiu stabilește, ulterior, o formulă care face legătura între unghiul de depolarizare și birefringența particulelor în suspensie, precum și de numărul acestor particule. Această formulă a fost verificată experimental. Pe baza rezultatelor obținute în domeniul cercetărilor privind birefringența în cîmp electric și birefringența în cîmp magnetic și-a elaborat și susținut teza sa de doctorat în anul 1924 la Sorbona.

Fenomenul Procopiu, precum și alte cercetări inițiate tot de către el au condus la noi cercetări atît în țară, cît și peste hotare[1].

Ștefan Procopiu a studiat, de asemenea, variațiile cîmpului magnetic terestru, întocmind prima hartă magnetică completă a țării noastre. A arătat că perioada de variație a momentului magnetic al Pămîntului este de 50 de ani și că din anul 1932 este în creștere. Are un număr impresionant de lucrări științifice, publicate în cea mai mare parte în reviste de prestigiu, unele de notorietate internațională.

## LEGEA LUI AMPÈRE

André Marie *Ampère* (1775—1836), fizician și matematician francez, supranumit de către Maxwell, *Newton al electricității*.

S-a născut în ziua de 22 ianuarie într-o localitate apropiată de Lyon. Tatăl său era poet și autor dramatic. În creșterea fiului său el a luat drept model pe „Emile" al scriitorului francez Jean-Jacques Rousseau. De aceea nu și-a trimis fiul la nici o școală; singurul profesor al lui Ampère a fost natura. Nu a avut vreun

[1] Ștefan Procopiu, *Permeabilité magnétique à haute fréquence des couches minces de fer, dans l'hypothèse d'une couche superficielle très mince non magnetique*, Ann. Sci. Univ. Jassy, 24 (1938), p. 257—262.

Ștefan Procopiu, N. Calinicenco, Gh. Vasiliu, *Mésures magnétique en 1937*, C.R. Acad. Sci. Roum. 2 (1938), p. 246—262 ș.a.

O. Groll, Phys. Z. 25, 233, (1924).

A. Boutaric, L. Bernard, Ann. Soc. Bruxelles, 57, 284 (1934).

Th. Neugebauer, Z. Physik, 73, 398 (1931); și multe altele.



**André Marie Ampère**

titlu universitar, însă a fost un autodidact prin excelență. A fost, totuși, profesor de analiză matematică și mecanică la Școala Politehnică din Paris și inspector general școlar.

Pasiunile sale au fost matematica, fizica, chimia, științele naturale, filozofia, sociologia, literatura și muzica. Fizica începuse să-l intereseze în mod deosebit după ce asistase la prezentarea experienței lui Oersted de către Arago. (Ampère era deja profesor la Școala Politehnică din Paris). A fost așa de impresionat de cele văzute încît lasă totul deoparte și se ocupă în mod continuu de fizică și în timp de numai două săptămîni descoperă acțiunea reciprocă dintre curenții electrici, stabilind și legile acesteia.

Ampère avea o memorie și o curiozitate de-a dreptul fenomenale.

În anul 1793 tatăl său este ghilotinat, în timpul revoluției, iar mai tîrziu, în 1803, după numai 3 ani de la căsătorie îi moare soția pe care o iubea foarte mult. Acestea au fost două lovituri ce au săpat urme adînci în sufletul său, resimțite în tot restul vieții.

În anul 1802 publică o lucrare intitulată „Considerații asupra teoriei matematice a jocurilor". Această lucrare a stîrnit mult interes în lumea științifică și datorită ei a fost numit, în anul 1805,

preparator la Școala Politehnică, iar după patru ani profesor. Și fiindcă activitatea sa se manifesta mai întîi în domeniul matematicii, în 1814 este ales membru al Academiei de Științe, secția de geometrie.

În decurs de numai doi ani de la descoperirea acțiunilor reciproce dintre curenții electrici, Ampère a creat o nouă ramură a electricității, denumită *electrodinamică*. Cu cîteva decenii mai tîrziu, fizicianul englez Maxwell scria despre electrodinamica lui Ampère: „Studiul experimental prin care Ampère a stabilit legile acțiunii mecanice care se exercită între curenții electrici constituie una dintre cele mai strălucite acțiuni ale științei. Se pare că acest ansamblu de teorie și experiență a țîșnit cu toată puterea și cu tot arsenalul său din creierul *Newtonului electricității*. Forma este perfectă, rigoarea inatacabilă, totul se reduce la o formulă din care se pot deduce toate fenomenele și care va trebui să rămînă totdeauna formula fundamentală a electrodinamicii".

Ampère a adus contribuții și în alte domenii ale științelor. Așa cum am mai arătat, avea preocupări enciclopedice. Făcînd o clasificare a științelor ajunge la concluzia că există 128 de științe. Cu acest prilej a prevăzut necesitatea unei noi științe, aceea a conducerii, și o numește *cibernetică*. De la această denumire provine numele ciberneticii din zilele noastre. Mai mult, obiectul ciberneticii de astăzi este cel prevăzut de Ampère. Merită menționat și faptul că Ampère cheltuia, din modestele sale venituri, mai mult pentru cercetări științifice. Din cauza datoriilor pe care le făcuse a fost determinat să ocupe și un post de profesor de liceu, precum și postul de inspector general școlar. Într-una din zilele anului 1836, pe cînd se afla în inspecție în cancelaria unui liceu din Marsilia, inima sa a încetat să mai bată. Acesta a fost sfîrșitul aceluia al cărui nume este cunoscut și rostit de toată lumea.

Se cunoaște că existența unui cîmp magnetic este legată de prezența unui curent electric și că liniile de cîmp magnetic sînt curbe continue (închise). Cîmpul magnetic și curentul electric există simultan, întotdeauna.

În cazul unui conductor rectiliniu parcurs de curent electric, liniile de cîmp au forma unor cercuri concentrice centrate pe axa conductorului. În cazul unui solenoid, liniile de cîmp au forma arătată pe figura 98, iar sensul lor se determină cu regula tirbușonului.



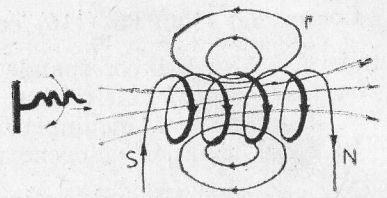



Fig. 98. Pentru punerea în evidență a spectrului magnetic al unui solenoid.

Într-un cîmp magnetic se pot construi curbe care să se bucure de proprietatea ca în fiecare punct al lor vectorul $\vec{B}$ să coincidă cu tangenta geometrică. Aceste curbe se numesc *linii de cîmp magnetic*.

Considerînd o linie de cîmp $\Gamma$, integrala de linie a vectorului $\vec{B}$ (circulația vectorului $\vec{B}$) pe această curbă se scrie

$$\oint_{\Gamma} \vec{B}\, d\vec{l} = \mu I \tag{159}$$

iar în cazul unui solenoid sau al unei bobine toroidale

$$\oint_{\Gamma} \vec{B}\, d\vec{l} = \mu N I. \tag{160}$$

Cititorul își amintește că în cazul cîmpului electrostatic se definește o mărime fizică ce caracterizează cîmpul în fiecare din punctele sale, independent de mediul în care este produs cîmpul. Această mărime fizică se notează cu $\vec{D}$ și se numește *inducție electrică*, iar cîmpul corespunzător este *cîmp de inducție electrică*. Legătura dintre cei doi vectori, $\vec{D}$ și $\vec{E}$, am dat-o sub forma (116). În mod analog, în cazul cîmpului magnetic se definește o mărime vectorială $\vec{H}$, al cărei modul este independent de mediul în care există cîmpul magnetic și care este legată de $\vec{B}$ prin relația

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \tag{161}$$

de unde

$$\vec{B} = \mu \vec{H}. \tag{162}$$

Comparînd (160) cu (116) constatăm că lui $\vec{B}$ îi corespunde $\vec{E}$, iar lui $\vec{H}$ îi corespunde $\vec{D}$. $\vec{H}$ se numește *intensitate a cîmpului magnetic*, iar cîmpul corespunzător — *cîmp magnetic*. $H$ se exprimă în amperi/m (A/m).

În cazul mediilor omogene și izotrope cei doi vectori $\vec{H}$ și $\vec{B}$ au aceeași linie de acțiune și același sens.

Ținînd seama de (162), relațiile (159) și (160) devin

$$\oint_{\Gamma} \vec{H}\,d\vec{l} = I \tag{163}$$

și

$$\oint_{\Gamma} \vec{H}\,d\vec{l} = NI. \tag{164}$$

Relațiile (159) și (160) sau (163) și (164), exprimă *legea lui Ampère*[1] sub forma *integrală* și reprezintă una din legile fundamentale ale electromagnetismului. $\vec{B}$, ca și $\vec{E}$, depind de mediul în care este produs cîmpul respectiv.

Această lege se folosește pentru calcularea tuturor dispozitivelor electromagnetice posibile. Ea are o importanță considerabilă și pentru faptul că a fost generalizată de către Maxwell, constituind *prima ecuație* în teoria electromagnetică a lui Maxwell.

(*A doua ecuație* este

$$\oint_{\Gamma} \vec{E}\,d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}.)$$

Prima ecuație a lui Maxwell stabilește legătura dintre curentul electric și cîmpul magnetic și arată că un cîmp electric variabil în timp este legat de un cîmp magnetic, de asemenea variabil în timp, ambele cîmpuri formînd cîmpul electromagnetic, totdeauna unic.

James Clerk *Maxwell*, fizician englez, membru al Societății Regale din Londra, s-a născut în anul 1831 la Edinburgh (Scoția) la cîteva luni după ce Faraday făcuse cunoscută celebra sa descoperire privind inducția electromagnetică. Dacă Faraday era un excelent experimentator, Maxwell a devenit un matematician de

[1] Denumită și *legea circuitului magnetic, legea circuitală a lui Ampère* sau *legea curentului total*.



**James Clerk Maxwell**

mîna întîi. La vîrsta de 14 ani a cucerit medalia Academiei pentru matematică. Pe cînd era de 19 ani s-a înscris la Universitatea din Cambridge, iar în 1854 și-a luat doctoratul. În 1856 a fost numit la catedra de filozofie naturală la Marischel College în Aberdeen, iar în 1874 este chemat la Cambridge ca prim director al Laboratorului Cavendish, care se înființase atunci.

Maxwell are lucrări foarte importante în teoria cinetico-moleculară a gazelor, în electromagnetism și în optică. În teoria cinetico-moleculară dă legea de distribuție a moleculelor după viteze, a cărei verificare experimentală a fost demonstrată de Stern în anul 1920. În electromagnetism introduce noțiunea de curent de deplasare și totodată dă, sub formă teoretică generalizată, legile experimentale ale fenomenelor electrice și magnetice și exprimă legile cîmpului electromagnetic printr-un sistem complet de ecuații, cunoscut sub denumirea de *ecuațiile lui Maxwell*. Aceste ecuații i-au permis să prevadă existența undelor electromagnetice, a căror descoperire experimentală aparține lui Hertz (în anul 1887).

Maxwell a elaborat „teoria electromagnetică a luminii", teorie revoluționară în acea vreme. După această teorie, rămasă valabilă și astăzi, lumina este o undă electromagnetică, adică o undă în care au loc vibrațiile celor doi vectori fundamentali: cîmp electric $\vec{E}$ și cîmp magnetic $\vec{H}$, în plane perpendiculare între ele.

Opera sa principală, *Tratat de electricitate și magnetism*, a fost publicată în anul 1873.

A decedat în anul 1879 la Cambridge.

*A doua ecuație a lui Maxwell constituie o generalizare a legii inducției electromagnetice* și arată că *orice cîmp magnetic variabil în timp se înconjoară cu linii de cîmp electrodinamic (închise).*

Sistemul complet de ecuații ale teoriei cîmpului electromagnetic se scrie

$$\begin{aligned}
&1)\ \oint_{\Gamma} \vec{H}\,d\vec{l} = I; && 4)\ \vec{B} = \mu\vec{H}\\
&2)\ \oint_{\Gamma} \vec{E}\,d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}; && 5)\ \vec{D} = \varepsilon\vec{E}\\
&3)\ I = I_c + I_t + I_d; && 6)\ \oint_{\Sigma} \vec{D}\,d\vec{S} = \rho\\
& && 7)\ \oint_{\Sigma} \vec{B}\,d\vec{S} = 0.
\end{aligned} \tag{165}$$

Ecuațiile a patra și a cincea sînt numite *relații de material*. Ecuațiile cîmpului electromagnetic sînt *ecuații liniare.*

Să analizăm acum, succint, prima, a doua, a șasea și a șaptea ecuație, pe care le vom scrie, în ipoteza că lipsește curentul de transport (convenție), adică $I_t = 0$:

$$\begin{aligned}
&a)\ \oint_{\Gamma} \vec{H}\,d\vec{l} - I_d = I_c; && c)\ \oint_{\Sigma} \vec{D}\,d\vec{S} = \rho\\
&b)\ \oint_{\Gamma} \vec{E}\,d\vec{l} + \frac{d\Phi}{dt} = 0; && d)\ \oint_{\Sigma} \vec{B}\,d\vec{S} = 0.
\end{aligned} \tag{166}$$

La ecuațiile a) și c), b) și d) se observă existența unei simetrii, în timp ce la ecuațiile a) și b), c) și d) existența unei asimetrii. Ecuațiile c) și d) arată că în timp ce cîmpul electric este un cîmp cu surse, cîmpul magnetic este un cîmp lipsit de surse, deci lipsit de purtători de sarcină magnetică. Totuși, ecuațiile a) și d) arată că purtătorii de sarcină electrică generează atît fenomene electrice, cît și fenomene magnetice.

Asimetria menționată cu privire la ecuațiile cîmpului electromagnetic a intrigat pe fizicieni, îndeosebi pe teoreticieni. Această asimetrie l-a determinat pe Dirac să postuleze, în 1931, existența unor particule denumite *monopoli magnetici*, purtători de sarcină magnetică, arătînd că pentru



a se stabili simetria ecuațiilor a) cu b) și c) cu d), relațiile b) și d) ar trebui scrise astfel:

$$\oint_{\Gamma} \vec{E}\,d\vec{l} + \frac{d\Phi}{dt} = I_m \quad \text{și} \quad \oint_{\Sigma} \vec{B}\,d\vec{S} = \rho_m \tag{167}$$

în care $I_m$ ar fi *curentul magnetic* corespunzător mișcării dirijate a purtătorilor de sarcină magnetică, iar $\rho_m$ *densitatea volumică de sarcină magnetică.* Ținînd seama de aceasta, ecuațiile cîmpului electromagnetic trebuie scrise în felul următor:

$$\begin{aligned}
&a')\ \oint_{\Gamma} \vec{H}\,d\vec{l} - I_d = I; && c')\ \oint_{\Sigma} \vec{D}\,d\vec{S} = \rho\\
&b')\ \oint_{\Gamma} \vec{E}\,d\vec{l} + \frac{d\Phi}{dt} = I_m; && d')\ \oint_{\Sigma} \vec{B}\,d\vec{S} = \rho_m
\end{aligned} \tag{168}$$

și astfel asimetria constatată a dispărut.

Se observă că nu a apărut nici o ecuație în plus, dar sistemul nou format este simetric și este valabil pentru ambele feluri de sarcini: electrică și respectiv magnetică.

Cu toate că deosebirea dintre cele două cîmpuri, electric și magnetic și imposibilitatea separării celor doi poli, deocamdată, contrazic existența monopolilor magnetici, Dirac este cel mai optimist. De altfel, cu un anumit prilej el a afirmat: „Ar fi ciudat dacă natura n-ar fi folosit această posibilitate". Este vorba, evident, de posibilitatea existenței monopolilor magnetici, denumiți și *monopoli magnetici ai lui Dirac.*

Calculele lui Dirac au dat și valoarea masei monopolilor magnetici, precum și valoarea sarcinii lor magnetice.

La început, ipoteza monopolilor magnetici a fost primită cu multe rezerve de către fizicieni. Ulterior, însă, unii fizicieni au început să se ocupe serios de această problemă, publicîndu-se mai multe sute de articole și efectuîndu-se numeroase încercări experimentale pentru descoperirea monopolilor magnetici. Deocamdată rezultatele sînt negative, dar cercetările continuă, deoarece ipoteza își menține valabilitatea.

Paul Adrien Maurice *Dirac* (n. 1902), fizician englez, membru al Societății Regale din Londra, laureat al premiului Nobel pentru fizică (împreună cu Schrödinger), în anul 1933 pentru lucrarea „Teoria nucleului atomic". Dirac este unul dintre fondatorii „mecanicii și electrodinamicii cuantice". Este cunoscută în fizică faimoasa *ecuație Dirac*, ecuație cu derivate parțiale de ordinul întîi, care

**Paul Adrien Maurice Dirac**

este, însă, o ecuație liniară și deci soluțiile se pot scrie exact, are coinciziune maximă și un foarte bogat conținut fizic. Ecuația lui Dirac este astăzi ecuația fundamentală în toată fizica cuantică relativistă.

Soluțiile ecuației descriu atît electronul, cît și pozitronul, și deci ecuația prezintă simetrie de particulă-antiparticulă. La acestea se adaugă frumoase proprietăți de invarianță: este invariantă față de o transformare Lorentz.

De aceea susține Dirac că legile fundamentale ale fizicii trebuie să fie frumoase, estetic exprimate din punct de vedere matematic. Și fizicianul japonez H. Yukawa (n. 1907) susține că „legile naturii trebuie să fie, în esență, simple" (Yukawa este și el laureat al premiului Nobel pentru fizică, în anul 1949).

Dirac a prevăzut teoretic existența pozitronului în anul 1928. După doi ani, adică în 1932, antiparticula electronului a fost descoperită de către fizicianul american C.D. Anderson (n. 1905), pentru care și acesta a primit premiul Nobel, în anul 1936. Dirac a pus bazele statisticii cuantice a fermionilor, independent de fizicianul italian Enrico Fermi (1901—1954), și el laureat al premiului Nobel pentru fizică (1938). Această statistică poartă astăzi denumirea de *statistica Fermi-Dirac*.

Opera principală a lui Dirac o constituie *Principiile mecanicii cuantice*, scrisă între anii 1929—1930.



Așadar, după Dirac, trebuie să existe sarcini magnetice negative și sarcini magnetice pozitive, aceste sarcini magnetice fiind purtate de către monopolii magnetici: monopol cu sarcină magnetică negativă și monopol cu sarcină magnetică pozitivă. Evident, existența acestora contrazice experiența cu ruperea magneților și experiențele de pînă acum, care nu au putut pune în evidență existența monopolilor[1]. Totuși, se crede că acești monopoli există, dar nu dispunem încă de aparatura necesară descoperirii lor și că ar avea masa și sarcina electrică mult mai mare decît masa, respectiv sarcina protonului. Interacțiunile dintre doi monopoli magnetici, arată calculul, ar fi de 4 692 de ori mai mari decît interacțiunile dintre doi electroni aflați la aceeași distanță.

Descoperirea monopolilor magnetici ar revoluționa industria electrotehnicii. Astfel, construcțiile acceleratoarelor de particule purtătoare de sarcină electrică sau a generatoarelor, a motoarelor electrice, ar deveni mult mai economice atît ca întindere în spațiu, cît și din punct de vedere al costurilor. Cînd vor fi descoperiți monopolii Dirac, nimeni nu știe și nici nu se poate prevedea.

Încheiem cu precizarea că pe lîngă marile avantaje practice pe care le-ar avea descoperirea existenței monopolilor magnetici, așa cum am arătat mai sus, ar fi și avantaje teoretice, în sensul că s-ar crea posibilitatea generalizării naturale a electrodinamicii și în același timp ar conduce la cuantificarea sarcinii electrice. Veți spune, stimați cititori: dar se știe în prezent că sarcina electrică este cuantificată! Da, într-adevăr, se știe din experiență, însă nu se cunoaște explicația teoretică a cuantificării ei.

În anul 1966, Iulian Schwinger, profesor la Universitatea Harward din S.U.A., a inclus monopolul magnetic în teoria cîmpurilor arătînd condițiile de cuantificare a sarcinilor electrice și a sarcinilor magnetice. În 1969, Schwinger dezvoltă teoria sa, publicînd-o într-un articol ce apare în același an, intitulat, „Modelul magnetic al materiei". Aici

[1] Recomandăm cititorilor articolul despre monopolul magnetic din „Revista de Fizică și Chimie", nr. 2 din 1976, și cartea *Fizica modernă și filozofie* de T. Toró, Editura Facla, Timișoara, 1973, p. 159—186.

el face presupunerea că ar exista niște particule care ar avea în același timp și sarcini electrice, și sarcini magnetice, particule pe care el le numește *dyoni*. Dyonii, după Schwinger, sînt o combinație de quark și monopol magnetic, ambele avînd sarcina electrică, respectiv magnetică, fracționară (quark-urile sînt particule elementare, deocamdată nedescoperite, care ar sta la baza tuturor celorlalte particule fundamentale: electron, proton, neutron ș.a.).

De mai mulți ani a început o adevărată vînătoare a monopolurilor și a dyonilor, fiind căutați pretutindeni: în Pămînt, în adîncurile oceanelor, pe Lună etc. Una dintre experiențe s-a desfășurat în anul 1973, cînd un balon a fost lansat și menținut în atmosferă timp de două zile și jumătate, în jurul localității Sioux City din statul Iowa, cu ajutorul căruia s-au făcut numeroase fotografii de urme ale particulelor grele. O urmă de particulă grea observată indică pentru aceasta o masă de aproape 200 de ori masa protonului și sarcina de 137 de ori sarcina electronului. S-a crezut că această particulă ar fi chiar monopolul lui Dirac, căutat cu atîta înverșunare de specialiști. Fizicienii mai au încă rezerve. Dacă acești monopoli magnetici nu vor fi descoperiți, atunci va trebui să se descopere un principiu care să interzică existența lor. Evident că acest principiu ar avea în fizică aceeași importanță ca și descoperirea monopolilor înșiși.

În fizică s-a întîmplat de multe ori ca ceva prevăzut a exista să fie descoperit mult mai tîrziu sau ca un fenomen descoperit să fie aplicat cu mult mai tîrziu. De exemplu, în anul 1928, tot Dirac a prevăzut existența pozitronului, care a fost descoperit în 1932, cînd deja unii fizicieni începuseră a se îndoi de posibilitatea existenței lui. Efectul Procopiu a fost descoperit în anul 1930, dar abia după 30 de ani i s-a găsit o aplicație practică de cea mai mare importanță și anume în construcția mașinilor de calcul, în realizarea memoriilor acestor mașini.

În orice caz, descoperirea monopolilor magnetici și, în plus, a dyonilor, pe lîngă consecințele experimentale și teoretice arătate, ar permite elucidarea unor probleme, neclare încă, în legătură cu quarkurile și altele.



## LEGEA REFRACȚIEI LUMINII

Se știe că atunci cînd un fascicul de lumină întîlnește suprafața de separare a două medii adiacente, transparente, cu proprietăți optice diferite, suferă simultan două fenomene: *reflexie* și *refracție*, adică parțial se reflectă și parțial se refractă. Refracția luminii constă în schimbarea direcției de propagare a fasciculului[1] de lumină atunci cînd trece dintr-un mediu într-altul, mediile avînd, așa cum am arătat mai sus, proprietăți optice diferite. Fenomenul refracției decurge în așa fel încît *planele de refracție și de incidență se confundă, iar raportul dintre sinusul unghiului de incidență și sinusul unghiului de refracție, pentru aceeași pereche de medii adiacente, este constant și egal cu indicele de refracție relativ al mediului al doilea față de primul mediu.* Aceasta este formularea legii refracției care, matematic, se exprimă prin *invariantul Snellius-Descartes*

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2, \qquad (169)$$

valabil pentru oricîte medii adiacente ar exista.

În (169), $n_1$ și, respectiv, $n_2$ sînt indicii de *refracție absoluți* ai celor două medii adiacente. Valorile lui $n$ depind de natura mediului, fiind diferite de la un mediu la altul, iar $i_1$ și $i_2$ sînt unghiurile de incidență și, respectiv, de refracție. Produsul $n \sin i$ se numește *apertură*.

Reamintim cititorilor că

$$n = \frac{c}{v}, \quad \text{iar} \quad n_{1,2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{și} \quad n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1}$$

și că

$$n_{2,1} = \frac{v_1}{v_2}; \quad v_1 > v_2,$$

unde $n$, respectiv $n_1$ și $n_2$ sînt indici de refracție absoluți, iar $n_{2,1}$ sau $n_{1,2}$ indici de refracție relativi; $v_1$ și $v_2$ reprezintă vitezele de propagare a luminii în cele două medii. În tabelul 5 se dau indicii de refracție absoluți ai unor substanțe.

[1] În continuare vom folosi termenul de *rază de lumină*, înțelegînd prin aceasta linia dreaptă după care se propagă lumina.

TABELUL 5

| MEDIUL (substanța) | $n$ |
|---|---|
| Aer (la p = 1 atm., T = 293 K) | 1,0003 |
| Apă | 1,333 |
| Sticlă, flint greu | 1,66 |
| Clorură de sodiu | 1,53 |
| Sticlă crown | 1,52 |
| Alcool etilic | 1,36 |
| Cuarț topit | 1,46 |
| Diamant | 2,42 |

Valori ale lui $n$.

Dacă, $n_2 < n_1$ $(v_2 > v_1)$, atunci din (169) rezultă că $i_2 > i_1$, iar dacă $n_2 > n_1$, $i_2 < i_1$. În fine, luînd $n_1 = -n_2$, rezultă $-i_2 = i_1$, adică *expresia matematică a legii reflexiei.* Semnul minus asociat unghiului de reflexie, $-i_2 = -r$, arată că unghiurile de incidență și respectiv de reflexie sînt măsurate de la normala în punctul de incidență în sensuri contrare. Așadar se poate considera că reflexia este un caz particular al refracției.

Să presupunem acum că o rază de lumină trece dintr-un mediu mai refringent într-unul mai puțin refringent (fig. 99) și să considerăm invariantul Snellius-Descartes (169). Cum

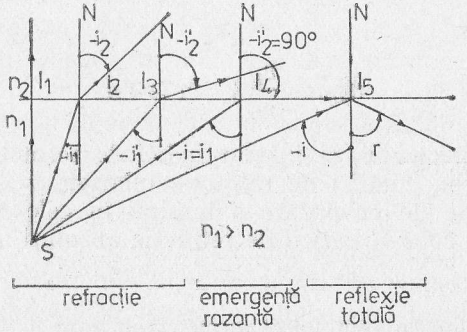



Fig. 99. Fenomenul de reflexie totală.



$n_1 > n_2$ și deoarece $\sin i_2 \leqslant 1$, rezultă că va exista un unghi de incidență $i_1 = i_L$ căruia îi va corespunde un unghi de refracție $i_2 = 90°$, astfel că dacă $i_1 > i_L$, nu se mai produce refracție, ci numai o reflexie. Această reflexie este numită *reflexie totală.* Din invariantul Snellius-Descartes rezultă

$$\sin i_L = \frac{n_1}{n_2} \tag{170}$$

de unde

$$i_L = \arcsin \frac{n_1}{n_2}, \tag{171}$$

unde $i_L$ se numește *unghi limită de reflexie.* În figura 99 nu s-au reprezentat razele reflectate pentru a nu încărca desenul. Să privim acum figura 100. Se observă că o rază de lumină ce are direcția normală la dioptrul (suprafața de separare a celor două medii) trece nedeviată, deoarece $i = 0$, $r = 0$. Celelalte raze de lumină sînt, însă, deviate, deci se refractă. Razele de lumină trec dintr-un mediu mai puțin refringent într-unul mai refringent. Se observă că unghiul de incidență de 90° (incidență razantă) corespunde unghiului de refracție $i_L$ și el reprezintă *unghiul limită de refracție.* Și aici este valabilă relația (169). Nici pe figura 100 nu s-au reprezentat razele reflectate, din același motiv menționat mai sus.

Fenomenul reflexiei totale nu numai că are numeroase aplicații, dar pe baza lui se explică o seamă de fenomene interesante observate în natură, în practică. Ne vom opri numai asupra cîtorva dintre ele.

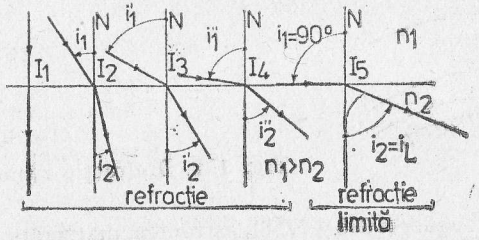



Fig. 100. Fenomenul de refracție limită.

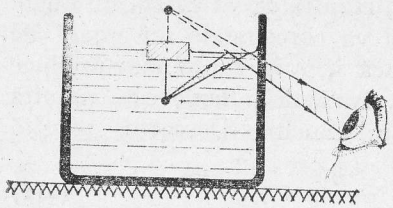


Fig. 101. Imaginea unui ac cu gămălie.

*Imaginea unui ac.* În figura 101 este arătat modul în care este văzută de ochi imaginea unui ac cu gămălie scufundat în apă. Explicația este evidentă.

*Refracția atmosferică.* Ca și presiunea atmosferică, densitatea aerului, mecanică și optică, scade cu cît altitudinea crește. De aceea, se poate considera atmosfera ca fiind formată din straturi de diferite densități optice, densități ce descresc cu creșterea înălțimii. Aceasta face ca traiectoria unei raze de lumină ce vine de la un astru $S$, să aibă forma din figura 102. Observatorul din $O$ va vedea astrul în $S'$. Curba $OS$ a fost studiată prima dată de către Bouguer[1] și Taylor[2] și se numește *solară*. Fenomenul descris mai sus se numește *refracție atmosferică*, denumire dată de Biot.

Cînd razele de lumină vin de la un astru, ca în figura 102, fenomenul se numește *refracție astronomică*, iar dacă razele

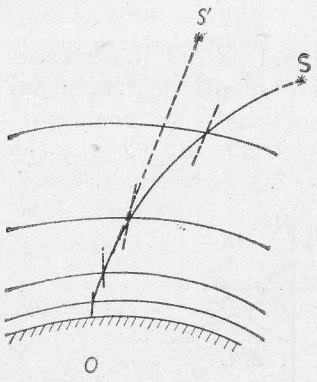



Fig. 102. Refracție atmosferică.

[1] Pierre Bouguer (1698—1758), astronom, matematician și fizician francez.

[2] Brook Taylor (1685—1731), matematician englez.



de lumină provin de la obiecte terestre, fenomenul este denumit *refracție terestră*.

Știm că viteza luminii în vid este mai mare decît viteza luminii în oricare alt mediu transparent. Înseamnă că prin aer rarefiat lumina se propagă mai repede decît prin aer mai dens. Cum atmosfera Pămîntului este mai rarefiată, cu cît ne îndepărtăm de suprafața solului, o rază de lumină ce pleacă de la Soare ajunge într-un punct de pe Pămînt după un drum corespunzător unui timp minim, sub un unghi mai apropiat de normală, atunci cînd trece prin regiuni mai dense, deci mai repede decît după o linie dreaptă (fig. 102). Prin urmare, atunci cînd Soarele se vede la orizont, el este în realitate sub orizont. Eclipsa totală de Lună care a avut loc în ziua de 19 iulie 1750 și observată la Paris cînd Soarele se vedea încă la orizont se explică în același mod, adică tot pe baza fenomenului de refracție atmosferică. Soarele, Luna, constelațiile, cînd sînt la orizont, par turtite după direcția verticală; munții par mai înalți cînd sînt priviți de la șes. Prin urmare, refracția atmosferică stă la baza explicării unor fenomene din natură, așa cum s-a arătat mai sus.

Se crede că Arhimede[1] ar fi fost primul care a sesizat fenomenul refracției atmosferice. Mai tîrziu acest fenomen a fost cunoscut de către Ptolemeu[2] și apoi Alhazen. Tycho Brahe[3], în vremurile moderne, corecta poziția astrelor pe baza fenomenului de refracție atmosferică. Totuși, Cassini[4] este primul care întocmește, pe bază de calcule, tabele cuprinzînd corecția de refracție.

În cazul unei stele care s-ar afla la înălțimea aparentă de 30′, corecția de refracție ar fi de 28′, iar pentru un astru la înălțimea aparentă de 5°, corecția de refracție ar fi

[1] Arhimede (c. 287—212 î.e.n.), matematician, fizician și inventator grec. S-a născut și a trăit în Siracuza. A descoperit legea care-i poartă numele și a inventat foarte multe mecanisme.

[2] Claudiu Ptolemeu (90—168 î.e.n.), astronom, matematician și geograf grec. Nu trebuie confundat cu persoane din dinastia Ptolemeilor, care au fost monarhi.

[3] Tycho Brahe (1546—1601), astronom danez.

[4] Gian Domenico Cassini (1625—1712), astronom francez de origine italiană, fondatorul observatorului astronomic din Paris.

de 10′. Tabelul 6 permite compararea corecțiilor de refracție. Se observă că cu cît înălțimea aparentă crește, valoarea corecției scade.

TABELUL 6

| Înălțimea aparentă a astrului | Corecția de refracție |
|---|---|
| 30′ | 28′ |
| 1° | 24′ |
| 5° | 10′ |
| 30° | 1′30″ |
| 45° | 1′ |
| peste 45° | sub 1′ |
| la zenit | 0′ |

Corecția de refracție astronomică.

*Mirajul.* Figura 103, a redă mirajul cînd aerul este mai cald la sol și mai rece cu cît ne depărtăm de suprafața Pămîntului. Mirajul se produce în special în deșert, de exemplu în Sahara. Nisipul se încălzește puternic și de la

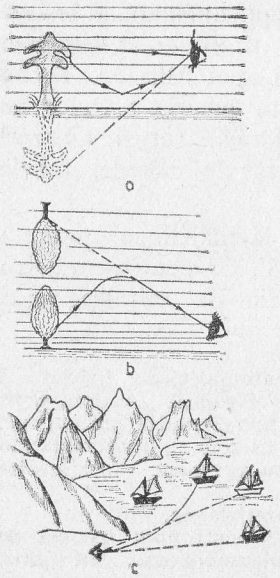



Fig. 103. a — Mirajul; b — mirajul invers (ranversat); c — mirajul lateral.



el se încălzește și aerul din imediata vecinătate. Pe măsură ce crește depărtarea față de nisip, scade temperatura și odată cu aceasta și viteza de propagare a luminii. De aceea, drumul urmat de lumină este o curbă; dar la ochiul observatorului vine și lumina directă, așa încît el vede obiectele atît drepte cît și parcă ar fi oglindite în apa unui lac. Cînd mergem cu un vehicul sau autovehicul pe o șosea înfierbîntată, în timpul verii, *ni se pare* că zărim apă. Apropiindu-ne de această „apă aparentă" observăm că ea se depărtează pînă dispare. Fenomenul se observă numai pe anumite porțiuni de șosea. Este și acesta un fenomen de miraj. Ceea ce se vede nu este altceva decît lumina reflectată de șosea. Explicația este perfect similară cu aceea care s-a dat mirajului observat în Sahara.

Fenomenul de miraj a fost explicat de către Monge[1], care a participat la campania lui Napoleon Bonaparte în Egipt (1798). În Egipt, casele sînt construite pe mici ridicături de teren. Din cauza mirajului oamenii le văd invers, ca și cum s-ar oglindi în apa unui lac. Apropiindu-se, ei constată că lacul se depărtează și apoi dispare. Explicația mirajului a mai fost dată în aceeași epocă cu Monge, dar independent de acesta, de către Wollaston[2]. Există și mirajul ranversat, mirajul lateral (fig. 103, b, c).

Miraje complexe împreună cu reflexii totale multiple dau fenomenul cunoscut sub denumirea de *„fata morgana"*. Acest fenomen se produce adesea în Sahara. Se mai produce în regiunea Neapole de pe coastele Siciliei, în strîmtoarea Messina ș.a. Cînd are loc un astfel de fenomen se văd corăbii drepte, inverse și deformate, aspectul schimbîndu-se dintr-un moment într-altul. A fost observat și studiat pentru prima oară de către Brydone, în anul 1770 și tot el l-a explicat.

*„Suspensiile drepte și mărite"* sau *„deplasările"* sînt fenomene care se produc chiar în orașe sau în regiuni muntoase și constă în aceea că obiectele sînt *drepte*, nu inversate, însă mărite și deplasate în sens vertical, iar uneori și lateral. Dacă cineva vine spre un oraș în timpul verii, în zile caniculare, cînd se găsește la o distanță de circa 4 km și se află pe un nivel mai scăzut decît nivelul orașului, atunci el

[1] Gaspard Monge (1746—1818), matematician francez.
[2] William Hyde Wollaston (1766—1828), chimist și fizician englez.

vede orașul ca și cum ar fi inundat. În astfel de cazuri nu se produc fenomene de reflexie totală.

*Explicarea strălucirii neobișnuite, a scînteierii diamantului.* Diamantul este carbon nativ cristalizat în sistemul cubic, în cristale octoedrice incolore, rareori albastre sau brune și are cea mai mare duritate dintre toate mineralele. Diamantul are indicele de refracție foarte ridicat, $n = 2{,}41$, iar unghiul său limită la contactul cu aerul este destul de mic, $i_L = 24{,}6°$ (unghiul limită de reflexie totală). Și acum să vedem cum se explică jocul de lumini a diamantului. Diamantului, prin prelucrare, i se dă o anumită formă, cu numeroase fațete, așa cum se vede în fig. 104,a. Atît forma cît și numărul fațetelor nu sînt arbitrare, ci totul este calculat în așa fel încît lumina, pătrunzînd în diamantul șlefuit, nu-l traversează, ci suferă reflexii totale pe numeroasele sale fațete, înainte de a ieși din cristal, așa cum se vede bine pe figura 104,b.

Lumina naturală care vine de la Soare este o lumină policromatică, alcătuită din radiațiile cunoscute: roșu, portocaliu, galben, verde, albastru, indigo și violet, ale căror lungimi de undă sînt diferite. Ansamblul acestor radiații formează *spectrul luminii albe*. Cînd lumina albă pătrunde

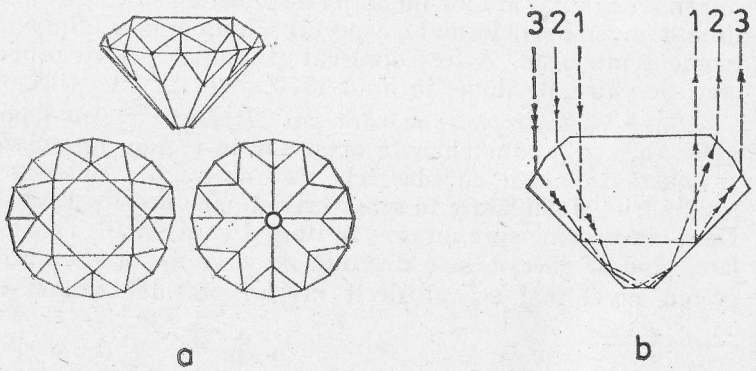



Fig. 104. a — Aspectul diamantului finisat; b — mersul razelor de lumină într-un diamant finisat.



într-un cristal de diamant, simultan cu fenomenul de refracție se produce și fenomenul de *dispersie*[1], apoi razele de lumină suferă multiple reflexii totale, impresionînd ochiul la ieșirea lor din cristal. Pentru ochi aceste raze par că țîșnesc din cristal, conferindu-i acestuia strălucire de neegalat, în culorile spectrale (ale curcubeului). Diamantul este considerat cea mai frumoasă dintre pietrele prețioase, tocmai datorită magnificului joc de lumini pe fațetele sale.

Este bine să știm că în timpul prelucrării și al șlefuirii unui diamant se pierde foarte mult din cristalul brut. Așa, de pildă, celebrul diamant Koh-i-Noor[2] de 105 carate[3], a fost obținut dintr-un cristal brut de 180 grame.

La prima prelucrare a rezultat un diamant de 37 grame, iar după a doua, și ultima, inclusiv șlefuirea lui, a rezultat un diamant de 21 de grame, ceea ce înseamnă un diamant de 105 carate. S-a pierdut mult prin prelucrare-șlefuire, dar a cîștigat incomparabil prin frumusețe.

Cele mai mari diamante din lume au denumiri ca: „Orlov", „Shah", „Koh-i-Noor", „Steaua sudului", „Regent". Ele se găsesc în muzeele naționale ale unor țări. În anul 1975 a fost obținut un diamant de 107 carate[4], iar în 1978 a fost descoperit un diamant de peste 350 de carate[5].

Se pregătesc diamante mari cu o asemenea formă încît să lase să treacă lumina de sus în jos. Dacă se privește transversal un astfel de diamant, atunci piatra limpede ca apa de izvor, pare opacă, neagră.

Nu este lipsit de interes să știm că diamantul artificial introdus în ulei *își pierde strălucirea*, pe cînd cel natural *nu*.

*Optica fibrelor*, ale cărei baze au fost puse după anul 1960, are multiple aplicații, unele de extremă importanță practică. La baza opticii fibrelor stau legea refracției și fenomenul de reflexie totală a luminii.

---

[1] Fenomenul de variație a indicelui de refracție al unei substanțe, cu lungimea de undă a radiației care pătrunde în ea.

[2] „Koh-i-Noor" înseamnă „Muntele de lumină".

[3] 1 carat = 0,2 grame.

[4] Este denumit „Cartier" și se află la New York.

[5] A fost extras din mina Cullinan din apropierea orașului Pretoria. În 1905 se extrăsese aici un diamant de 3 025 carate, fiind cel mai mare de pînă acum.

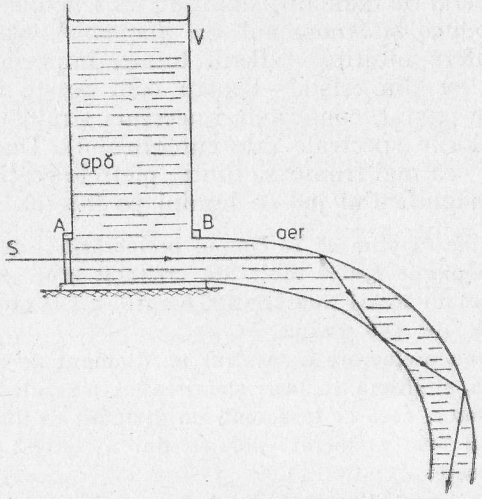



Fig. 105. Fîntîna luminoasă.

Să ne imaginăm următoarea experiență simplă, cunoscută sub denumirea de *fîntîna luminoasă* (fig. 105). Un vas mare $V$ este prevăzut la bază cu două deschideri laterale diametral opuse. Una dintre deschideri $A$ este acoperită etanș cu un geam transparent, iar cealaltă $B$ este liberă, dar acoperită inițial cu un dop. În vas se introduce apă. Prin deschiderea $A$ se trimite un fascicul luminos îngust, suficient de intens și se scoate dopul. Mersul razelor de lumină în vîna de lichid ce iese prin deschiderea $B$ se vede foarte bine pe figură. Lumina suferă mai multe reflexii totale, producînd un frumos efect. Dacă vîna de lichid se transformă în picături fine, de apă, atunci iluminarea este mai puternică. În cazul că lumina folosită este albă, atunci fenomenul este mai spectaculos, deoarece se văd toate culorile spectrale.

Fie acum o baghetă de sticlă sau dintr-un material plastic transparent, cum ar fi de exemplu plexiglasul. Prin încălzire o curbăm ușor ca în fig. 106. Perpendicular pe fața $A$ trimitem un fascicul îngust de lumină monocromatică; acesta, după ce suferă mai multe reflexii totale, iese prin fața $B$, dînd pe un ecran $E$, aflat în apropiere, un spot



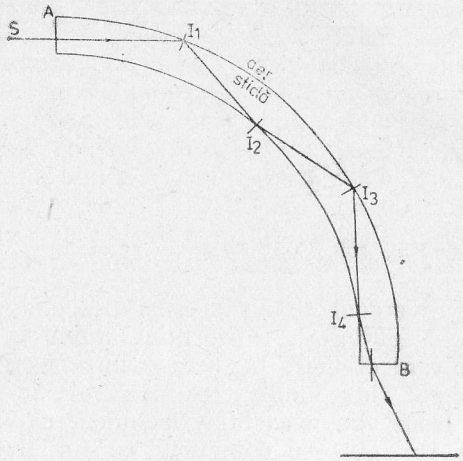



Fig. 106. Conductor de lumină curbat.

luminos. Aparent, drumul urmat de lumină este curb, în realitate, însă, drumul străbătut de lumină este cel care se vede pe figură. Se observă o pronunțată analogie între această experiență și fîntîna luminoasă.

În figura 107 se arată drumul urmat de lumină în cazul cînd bagheta este dreaptă. Se vede că fasciculul îngust de lumină trebuie să pătrundă prin fața $A$, sub un anumit unghi pentru ca să sufere fenomenul de reflexie totală. În tot lungul baghetei, unghiurile $i$ și $r$ păstrează aceeași valoare. În acest fel fasciculul de lumină străbate bagheta fără pierderi de energie luminoasă și iese după direcția $I_BI'$. Evident că numai razele de lumină incidente pe fața $A$ sub un unghi mai mic decît $i_L$ suferă reflexii totale. Rezultă că, dacă pe fața $A$ trimitem un fascicul de lumină homocentric convergent, cu deschiderea egală cu $2i_L$, toate razele ce formează fasciculul incident vor suferi reflexii totale multiple, iar la ieșire vor alcătui un fascicul, de asemenea, homo-

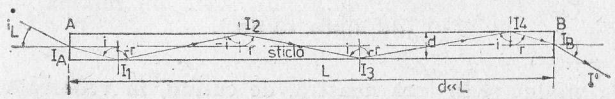



Fig. 107. Conductor de lumină drept.

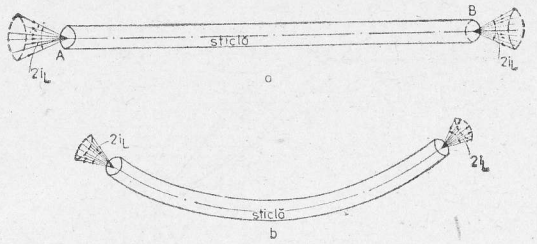



Fig. 108. Conductor de lumină.

centric, dar divergent avînd aceeași deschidere $2i_L$ (fig. 108, a și b). Neglijîndu-se absorbția luminii în materialul din care este confecționată bagheta și imperfecțiunile materialului, întregul flux luminos ce pătrunde în baghetă se regăsește la ieșire din aceasta. Conchidem că bagheta, fie ea curbă or dreaptă, se comportă ca un *„conductor" de lumină*. Conductoarele de lumină au numeroase aplicații; unele dintre ele le vom arăta mai departe.

Să considerăm acum un fascicul paralel format dintr-un număr foarte mare de fibre[1] (fascicul de „conductoare" de lumină) foarte subțiri, fiecare fibră avînd diametrul de aproximativ 50 μm (0,05 mm) și cu lungimea de cîteva zeci de centimetri. Pentru a facilita înțelegerea problemei propuse, vom reprezenta în desen un fascicul format din 25 de fibre cu diametrul mult mărit. Fețele fasciculului sînt cuprinse în planele $P$ și $Q$, planele fiind paralele între ele (fig. 109). Înnegrim fețele unei fibre, $a$ și $a'$, și apoi trimitem spre fața din planul $P$ a fasciculului de fibre un fascicul

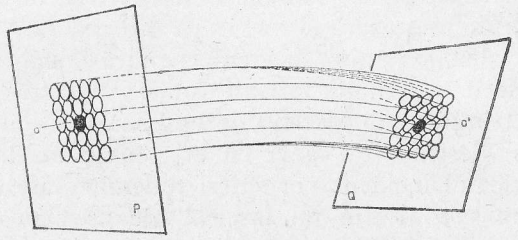



Fig. 109. Fascicul de conductoare de lumină (de fibre optice).

[1] Se produc și în țara noastră, de curînd, în vederea modernizării telefoniei.



luminos suficient de intens; pe o placă fotografică așezată în partea dinspre planul $Q$, după developare, va apare neînnegrită numai porțiunea corespunzătoare extremității $a'$ a fibrei $aa'$, deoarece asupra acestei mici regiuni nu a acționat lumina. În rest, însă, prin acțiunea luminii (ce străbate fibrele) asupra emulsiei fotografice apar transformări care reprezintă așa-numita *imagine latentă*. Introducînd placa fotografică într-o soluție revelator, prin acțiunea acesteia asupra emulsiei de pe placă, halogenura de argint se reduce pînă la argint metalic, dar numai acolo unde a acționat lumina atunci cînd a fost utilizată placa, deci acolo unde există imaginea latentă. După trecerea prin baia de fixare regiunile de pe placă în care a acționat lumina apar înnegrite, deoarece soluția-fixator dizolvă acele particule de halogenură care nu au fost influențate de lumină, rămînînd astfel numai imaginea formată din particule de argint metalic. După terminarea operației de fixare se obține negativul fotografiei. Pozitivul se realizează foarte ușor.

Să plasăm acum în apropierea extremității $P$ un ecran pe care am desenat un pătrat negru cu latura cît 8—9 diametre ale fibrelor, adică de 0,40—0,45 mm (fig. 110,a). Pe placa fotografică plasată în vecinătatea extremității $Q$ se va observa, după developarea ei, imaginea pătratului — albă, deoarece fibrele aflate în dreptul pătratului nu transportă lumina și deci nu este impresionată placa fotografică în dreptul fibrelor respective. În figura 110,b se arată pozitivul imaginii pătratului obținut cu un fascicul de fibre cu secțiunea transversală circulară. Ne dăm seama că cu cît diametrul fibrelor este mai mic, în raport cu dimensiu-

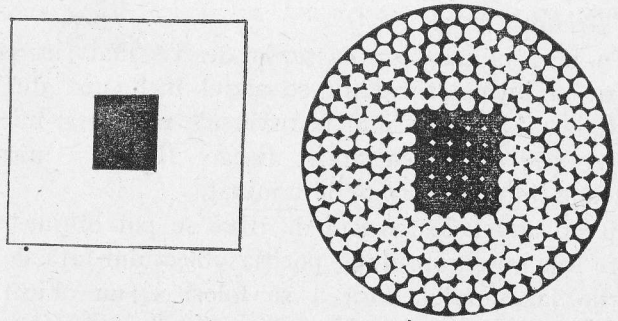



Fig. 110. Un obiect (a) și imaginea sa (b).

nile obiectului (pătratul negru în cazul de față), cu atît imaginea lui pe placa fotografică este mai fină, mai netă. Prin urmare, cu ajutorul unui fascicul de fibre putem obține imaginea unui obiect, imaginea fiind identică cu obiectul și deci fasciculul de fibre se comportă ca un instrument optic. Dar, așa cum se știe, instrumentele optice clasice au în alcătuirea lor lentile, cum sînt: refractoarele (lunetele) — Kepler, Galilei, terestră; alte instrumente au în componența lor lentile, oglinzi și prisme cum sînt: reflectoarele (telescoapele reflectoare) tip Newton (cu viziune laterală) sau telescopul reflector cu viziune directă ca telescopul reflector al lui Cassegrin (în care intră lentile și oglinzi) sau reflectorul lui Maxutov sau, încă, binoclurile cu prisme (în a căror componență intră lentile și prisme cu reflexie totală) ș.a. Oricare ar fi instrumentul optic, el dă pentru obiectele situate într-o regiune a spațiului denumită spațiu-obiect, imagini într-o altă regiune a spațiului, denumită spațiu-imagine, grație fenomenului de difracție care se produce datorită deschiderii lentilei. Lentila are numai rolul de a apropia imaginea și, deci, de a reduce dimensiunile aparatului, datorită suprafețelor refractante. Prismele au rolul de a schimba direcția fasciculelor de lumină ca urmare a fenomenelor de refracție, oglinzile plane schimbă direcția fasciculului de lumină grație fenomenului de reflexie ș.a.m.d.

La baza mecanismului formării imaginilor în cazul fasciculului de fibre, însă, stau legile fundamentale ale opticii și fenomenul de reflexie totală a luminii. Instrumentele avînd ca piesă optică principală un fascicul de fibre se numesc *instrumente de optica fibrelor*. Instrumentele de optică a fibrelor pot fi înzestrate cu un obiectiv și un ocular plasate la extremitățile $P$ și $Q$.

Un fascicul de fibre ca acela descris mai sus poate fi încălzit și întins, subțiindu-se astfel încît una din extremități să aibă dimensiuni transversale mult mai mici decît cealaltă (fig. 111); ca atare, fiecare fibră își micșorează diametrul într-un raport determinat.

Cu un astfel de fascicul de fibre se pot obține imagini mărite sau micșorate după poziția obiectului față de extremitățile fasciculului, fără a se folosi vreun obiectiv sau ocular. De pildă, dacă obiectul va fi plasat în fața extremității $Q$, imaginea obținută va fi mărită, iar dacă obiectul



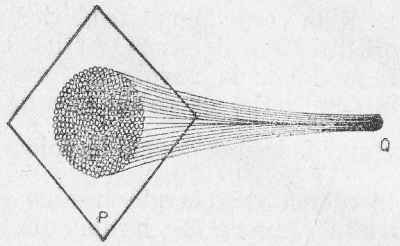



Fig. 111. Un fascicul de fibre cu secțiune variabilă se comportă ca un instrument optic.

va fi așezat în fața extremității $P$, imaginea obținută în partea $Q$ va fi micșorată. Imaginea poate fi reală sau virtuală. În figura 112 se arată un mod de a construi imaginea unui obiect. Pentru a cuprinde un cîmp cît mai mare de observație, extremității $P$ i se dă forma concavă. În figura

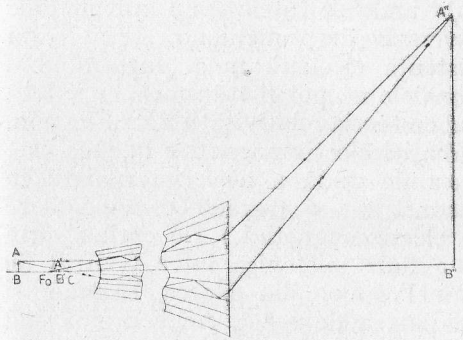



Fig. 112. Un procedeu de a construi imaginea unui obiect.

113 se arată mersul razelor, de la un punct obiect, în cazul unei astfel de suprafețe sferice concave (mai exact un dioptru sferic concav divergent) pentru a înțelege cum s-a construit imaginea în figura 112.

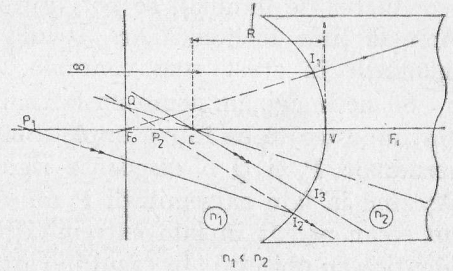



Fig. 113. Mersul razelor de lumină într-un dioptru sferic.

S-au confecționat cabluri din fibre transparente sintetice ori din fibre de sticlă. Astfel de cabluri sînt flexibile și pot fi modelate la nevoie în formă de colac. Dacă la intrarea într-un astfel de cablu energia luminoasă are valoarea $E_i$, atunci la ieșirea din cablu valoarea este de aproximativ $\frac{1}{2} E_i$. Pierderea de energie luminoasă se produce îndeosebi din cauza absorbției luminii de către substanța din care sînt confecționate fibrele. Așa fiind, se admite că reflexia în interiorul fibrelor este aproape totală. În fiecare fibră dintr-un astfel de cablu, lumina suferă pînă la 48 000 de reflexii totale.

S-au confecționat cabluri din fibre în care fibrele au diametrul de ordinul de mărime a lungimii de undă a radiației luminoase. Fiecare fibră se comportă ca un *ghid de unde optic*. (Prin ghid de unde se înțelege un tub metalic gol, cu secțiunea transversală dreptunghiulară și ai cărui pereți interiori au rezistență electrică nulă. Într-un ghid de unde energia sau semnalele nu pot fi transmise cu viteză mai mare decît $c$, în acord cu teoria relativității a lui Einstein. Lungimea de undă a radiației electromagnetice în ghid este mai mare decît lungimea de undă a aceleiași radiații în spațiul liber. Aceasta constituie o dovadă convingătoare că lumina este o undă electromagnetică.) De curînd, prin anul 1977, s-a instalat o linie telefonică între Centrul de Cercetări al Ministerului Poștelor din Marea Britanie și localitatea Ipswich (din partea de est a Angliei), folosind fibre optice. Telefonul funcționează pe baza transmiterii undelor luminoase prin aceste fibre. Ceea ce este important este faptul că în acest caz semnalele transmise sînt mult mai puternice decît în cazul cablurilor tradiționale. Un alt avantaj și mai mare este că numai printr-o singură fibră (conductor de lumină), se pot transmite 120 de convorbiri. Această linie telefonică are o lungime de 13 km. Experimentările în acest sens continuă.

Să ne imaginăm acum un fascicul de fibre în care fibrele sînt amestecate ca într-o împletitură, păstrîndu-se pe fețele terminale $P$ și $Q$ o dispoziție riguros identică a fibrelor. Așezînd în fața extremității $P$ un obiect și iluminîndu-l, pe un ecran așezat în fața extremității $Q$ se obține o imagine identică cu obiectul. În cazul în care extremitatea $Q$ nu este

Fig. 114. Fascicul de fibre optice împletite.

identică cu $P$ (fig. 114), imaginea obiectului apare deformată. Să presupunem acum că tăiem în două părți un fascicul a cărui fibre sînt total împletite, fețele $P$ și $Q$ fiind identice prin construcție (fig. 115). Fețele $p$, $q$ rezultate după tăiere sînt, evident, identice și ele. Fața $p$ este identică cu $q$, dar ambele sînt diferite de $P$ sau $Q$. Să admitem că două persoane vor să întrețină o corespondență confidențială. Pentru aceasta fiecare din ele ia cîte o parte din fasciculul de fibre. Cînd una din persoane vrea să trimită un mesaj secret celeilalte persoane, procedează astfel: persoana respectivă scrie mesajul pe un ecran transparent $E$ și îl așează apoi în vecinătatea feței $P$ sau $Q$ iluminîndu-l. Pe un film sau pe o placă fotografică $E_1$, așezată în apropierea feței $p$ sau $q$, se obține o imagine deformată, neclară. Placa sau filmul developat îl transmite celeilalte persoane, care procedează exact invers, adică așează clișeul primit în vecinătatea feței $p$ sau $q$, iar pe un ecran $E_2$, aflat în apropierea feței $P$ sau $Q$ se proiectează imaginea care este foarte clară, identică cu mesajul înscris pe ecranul transparent, deoarece $P$ este identic cu $Q$. Se spune că clișeul reprezintă codificarea mesajului transmis, iar imaginea obținută de către persoana ce posedă cea de a doua jumătate a fasciculului de fibre reprezintă mesajul decodificat. Evident că decodificarea nu poate fi făcută decît de persoana care posedă cea de a doua jumătate a fasciculului de fibre. Acesta constituie un procedeu foarte modern de transmitere a mesajelor secrete. Fasciculele de fibre folosite în acest scop sînt confecționate din cîte un milion de fibre identice, fiecare fibră avînd un diametru în jurul a 50 μm, fețele $P$ și $Q$ avînd forma unui pătrat cu latura de 5 cm. Mesajele

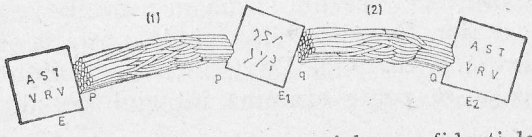



Fig. 115. Transmiterea mesajelor confidențiale cu ajutorul fasciculelor de fibre optice.

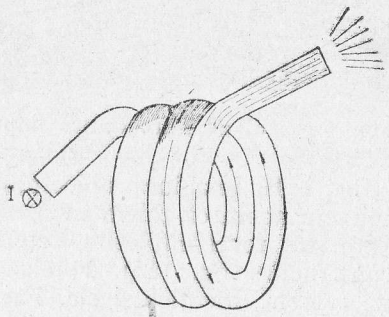



Fig. 116. Un fascicul de fibre în formă de colac transmite lumina de la sursa de lumină, *I*.

transmise cu un astfel de fascicul de fibre cuprind un număr impresionant de informații[1].

În fine, figura 116 arată cum un fascicul de fibre poate fi modelat în formă de colac și, dacă diametrul nu e prea mic, funcționează foarte bine. Evident că sînt și alte aplicații. Dăm mai jos aplicații în domeniul medical.

Fasciculele de fibre se mai folosesc în medicina internă, în endoscopie aparatele fiind denumite *fibroendoscoape*. Ele sînt echipate cu un sistem special de iluminare internă și servesc la examinarea oricărui organ cavitar sau tubular din organismul uman fără intervenții chirurgicale. După destinația ce o au, fibroendoscoapele poartă denumiri corespunzătoare. Așa de pildă, pentru examinarea bronhiilor se folosește *fibrobronhoscopul*, iar pentru examinarea stomacului și duodenului se folosește *fibrogastroduodenscopul*. Alte fibroendoscoape servesc la examinarea intestinelor, esofagului, laringelui ș.a. Un exemplu: medicii de la Universitatea din Erlangen au reușit, de curînd, să extirpeze cu succes polipi intestinali, folosind un fibroendoscop prevăzut cu niște lănțișoare fine din sîrmă inoxidabilă ce erau dirijate din exterior. După vechile metode, operația era extrem de complicată și riscantă. De asemenea, cu ajutorul fibroendoscoapelor se poate examina întregul tub digestiv. În

[1] Vezi și în „Revista de fizică-chimie", nr. 5 și 6 (1976), articolul *Optica fibrelor* de Gh. Huțanu.



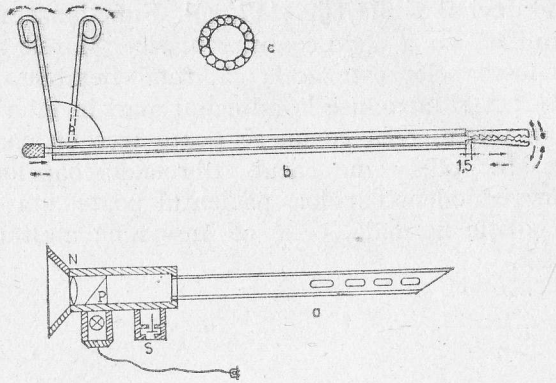



Fig. 117. a — Bronhoscop clasic; b — clește special pentru luarea de probe prin bronhoscop; c — secțiune printr-un tub de fibrobronhoscop, fibrogastroduodenscop, fibrorectoscop.

acest fel, medicii au posibilitatea să depisteze o serie de maladii grave în faza incipientă, cum ar fi cancerul intestinal.

În figura 117, a se arată un bronhoscop clasic[1] folosit pentru studierea interiorului bronhiilor; de aici și denumirea. Aparatul constă dintr-un set de patru țevi cromate, cu diametre diferite și prevăzute cu cîteva orificii. Diametrul țevilor este 0,9; 1, 1; 1,2; 1,3 cm și sînt folosite în raport cu vîrsta pacientului ale cărui bronhii trebuie examinate. Țeava se montează la un mic aparat ce cuprinde în alcătuirea sa o prismă cu reflexie totală *P*, un bec de 5W și o supapă *S*, pentru a permite pacientului să respire în timpul examinării. Prin bronhoscop se poate introduce instrumentul din figura 117, b, care se aseamănă cu un foarfece și care servește fie pentru badijonare în interiorul bronhiilor, fie pentru luare de probe pentru analize. Se pot face și fotografii, montînd un aparat fotografic la extremitatea *N* (asemănător cazului cînd se fac fotografii la microscop). Funcționarea bronhoscopului reiese din figură.

Fibroendoscoapele sînt asemănătoare, numai că în locul țevilor rigide au fascicule de fibre (cu număr mic de fibre)

[1] Grație amabilității doctorului D-tru Cristea de la Spitalul județean din Galați.

formînd țevi flexibile (fig. 117, c)[1]. Funcționarea este perfect similară cu a endoscoapelor clasice. Marele avantaj al fibroendoscoapelor este acela că, fiind flexibile, fasciculele de fibre pot fi introduse la adîncimi mari în interiorul organismului uman, ceea ce nu se poate face cu endoscoapele clasice. În plus, în cazul fibroendoscoapelor sau a fibrogastroduodenscoapelor, pacientul poate sta cu capul într-o poziție normală, ceea ce înseamnă mult pentru cel examiant.

[1] În secțiune. Desenul este mult mărit pentru a se înțelege mai bine cum este confecționată țeava din fibre.



# LEGI DE CONSERVARE

*„Fiecare proces care are loc în natură poate fi considerat ca transformarea diferitelor tipuri de energie unele în altele"*

Max Planck

## LEGEA CONSERVĂRII ENERGIEI MECANICE TOTALE A UNUI SISTEM

În fizică se întîlnesc foarte multe legi. Printre acestea un rol deosebit de important îl au *legile de conservare*, legi care exprimă caracterul aditiv-conservativ al unor mărimi fizice. Aceste legi au mare importanță teoretică și practică, deoarece sînt simple și universale. Orice lege de conservare arată că *atunci cînd un anume sistem fizic evoluează, un anumit aspect al sistemului se menține neschimbat*. Putem cita multe legi de conservare; de exemplu, legea conservării energiei mecanice totale a unui sistem, legea conservării impulsului total al unui sistem, legea conservării sarcinii electrice, legea conservării parității și multe altele. Toate legile de conservare din fizică reprezintă de fapt cazuri particulare ale legilor generale de conservare a materiei și a mișcării ei, iar legea conservării energiei mecanice totale a unui sistem este, în plus, și un caz particular al legii generale de conservare a energiei cuprinsă în primul principiu al termodinamicii.

Să ne imaginăm două plane înclinate, de lungimi diferite $l_1$ și respectiv $l_2$ ($l_1 > l_2$), avînd aceeași înălțime $h$. Lungimile fiind inegale, unghiurile formate cu orizontala sînt de asemenea neegale ($\alpha_1 < \alpha_2$). Vom presupune că planele sînt identice din punctul de vedere al gradului de prelucrare a suprafeței lor. Pe aceste plane lăsăm să se deplaseze, cu viteză inițială zero, două cărucioare identice, de la aceeași înălțime, $h$. În ambele cazuri (fig. 118) deplasarea are loc

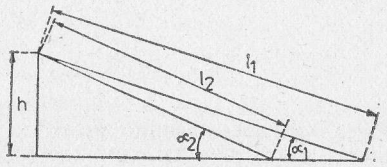



Fig. 118. Independența vitezei corpului de lungimea planului înclinat.



datorită unei componente a forței gravitaționale; se poate demonstra că vitezele cu care ajung ele la baza planului sînt egale și că această viteză este aceeași, ca valoare, cu viteza cu care ar ajunge cărucioarele la același nivel cu baza planului dacă ar cădea liber de la înălțimea $h$. Din demonstrație se obține formula

$$v^2 = 2gh. \tag{172}$$

Relația (172) este valabilă pentru oricare alte corpuri identice cu condiția ca mișcarea să înceapă din punctul cel mai de sus, deci de la aceeași înălțime $h$.

Fie acum un plan înclinat (fig. 119) și pe el două repere $A_1$ și $A_2$ aflate la înălțimile $h_1$ și respectiv $h_2$. Pe plan se

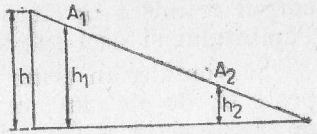



Fig. 119. Variația pătratelor vitezelor este independentă de forma și lungimea drumului pe care se deplasează corpul.

rostogolește un corp a cărui viteză, cînd trece prin dreptul reperelor, este $v_1$ și respectiv $v_2$. Corpul începe rostogolirea de la înălțimea $h$. Viteza corpului cînd trece prin dreptul reperelor se va scrie, ținînd seamă de (172),

$$v_1^2 = 2g(h - h_1); \qquad v_2^2 = 2g(h - h_2)$$

și

$$v_2^2 - v_1^2 = 2g(h_1 - h_2). \tag{173}$$

Relația (173) se mai poate pune sub forma

$$\frac{1}{2}v_1^2 + gh_1 = \frac{1}{2}v_2^2 + gh_2 = \text{const.}$$

sau

$$\frac{1}{2}v^2 + gh = \text{const.} \tag{174}$$

Aceasta este o lege importantă și cu ajutorul ei se poate demonstra legea conservării energiei totale, mecanice, a unui sistem (corp). Expresia (174) a fost obținută în condițiile în care s-a neglijat frecarea. Ea este valabilă pentru orice plan înclinat, pentru orice drum care constă din urcări și coborîri continui. (Repetăm, cu condiția să se facă abstracție de frecare!) Justificarea celor afirmate constă în aceea

că orice drum poate fi împărțit în porțiuni rectilinii și, evident, cu cît aceste porțiuni sînt mai mici, cu atît linia frîntă formată din ele se va apropia de o curbă. Așa fiind, fiecare porțiune dreaptă ce alcătuiește linia curbă se poate considera ca o porțiune de plan înclinat și, deci, se poate aplica legea stabilită prin relația (174). Aceasta înseamnă că în orice punct al traiectoriei, expresia (174) este identică.

Relația (173) ne arată că variația pătratelor vitezei depinde *numai* de diferența de nivel $(h_1 - h_2)$ și *nu depinde* de forma și lungimea drumului pe care s-a deplasat corpul considerat. Practic, însă, nu se întîmplă chiar așa, deoarece frecarea este prezentă pretutindeni, ea neputînd fi înlăturată. Formulele (173) și (174) sînt adevărate numai cînd corpul se mișcă în cîmp gravitațional, în cazul de față al Pămîntului și deci sub influența forței gravitaționale.

Să considerăm acum un scripete fix și o sfoară trecută peste el, de ale cărei capete sînt prinse corpurile de masă $M$ și respectiv $m$ (fig. 120), $M > m$. Sistemul se va mișca accelerat în sensul arătat pe figură, adică $M$ va coborî, în timp ce $m$ va urca. Luînd în considerare două momente ale mișcării sistemului format din ansamblul celor două corpuri (masa sforii o considerăm neglijabilă în comparație cu masa

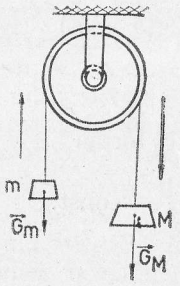



Fig. 120. Pentru demonstrarea conservării energiei mecanice totale a unui sistem.

corpurilor), se poate arăta că suma expresiilor (174) înmulțită cu masele celor două corpuri este tot timpul constantă. Cu alte cuvinte, se poate demonstra că

$$m\left(\frac{v_2^2}{2} + gh_2\right) + M\left(\frac{v_2^2}{2} + gH_2\right) = m\left(\frac{v_1^2}{2} + gh_1\right) + M\left(\frac{v_1^2}{2} + gH_1\right)$$



adică, în general, se poate scrie

$$\left(\frac{mv^2}{2} + mgh\right) + \left(\frac{Mv^2}{2} + MgH\right) = \text{const.} \qquad (175)$$

sau

$$\sum_{i=1}^{n} E_{c_i} + \sum_{i=1}^{n} E_{p_i} = \text{const.} \qquad (176)$$

În expresia (175) cantitatea $\frac{mv^2}{2}$ și respectiv $\frac{Mv^2}{2}$ se numește *energie cinetică* a corpului, iar produsul $mgh$ sau $MgH$ se numește *energie potențială* sau *energie de configurație*.

Relația (175) exprimă legea conservării energiei totale mecanice a unui sistem, a unui sistem izolat de două corpuri, dar ea se poate aplica la sisteme cu $n$ corpuri [relația (176)]. În cazul unui singur corp, relația (175) se reduce la (174).

Se observă că pentru ca relația (176) să se mențină constantă, trebuie ca o creștere a energiei cinetice să fie compensată de o scădere a energiei potențiale și invers. Putem afirma că *într-un sistem izolat de corpuri* (deci *în lipsa acțiunilor din exterior și a frecărilor*) *energia mecanică se poate transforma dintr-o formă în alta* ($E_c \rightleftarrows E_p$), *energia totală — adică suma energiilor cinetice și potențiale — rămînînd constantă*. Aceasta este formularea *legii conservării energiei totale a unui sistem mecanic* și se exprimă matematic prin relația (176).

În concluzie, energia cinetică ($E_c$) a unui corp este dată de jumătatea produsului dintre masa corpului și pătratul vitezei lui, iar energia potențială este dată de produsul dintre greutatea corpului respectiv și înălțimea la care se află față de sol, sau alt nivel de referință ales arbitrar. Este bine să reținem că nu se poate determina energia potențială a unui corp, ci numai variațiile ei și acestea prezintă de fapt importanță practică. Totuși, pentru a calcula energia potențială a unui corp, se alege un nivel de referință, nivel corespunzător stării în care valoarea ei (a energiei potențiale) este nulă. Acest zero de energie potențială se alege convențional și deci este cu totul relativ. De altfel, în general vor-

bind, oricare din stările unui sistem se poate lua ca stare cu energie nulă și deci ca nivel de referință pentru energia potențială. Să dăm un exemplu și anume să ne imaginăm un resort elastic suspendat, în repaus. Spunem că energia lui potențială este nulă. Acest zero, însă, este relativ, deoarece în urma unor transformări interne resortul ar putea să se mai destindă, deci să treacă într-o altă stare. Să considerăm acum ca zero de energie potențială starea corespunzătoare suprafeței solului. Să arătăm că și acest zero este relativ. Într-adevăr, dacă un corp aflat la suprafața solului ar cădea într-o groapă săpată lîngă el ar avea loc o transformare a energiei potențiale în energie cinetică, a cărei valoare ar trece printr-un maximum atunci cînd corpul ar atinge fundul gropii. Și exemplele ar putea continua. De fapt, nu trebuie să vorbim de energia potențială a unui corp, ci de energia potențială a sistemului corp-Pămînt. Totuși, din comoditate, se spune adesea, energia potențială a corpului. Energia mecanică se măsoară, ca și oricare altă formă de energie, în joule.

Experimental se poate demonstra transformarea reversibilă a energiilor cinetică și potențială ($E_c \rightleftarrows E_p$) cu ajutorul *pendulului lui Maxwell* (fig. 120). Acest pendul constă

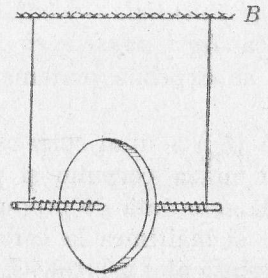



Fig. 121. Pendulul lui Maxwell.

dintr-un cilindru de lemn sau de metal, cu înălțimea foarte mică în comparație cu diametrul. Cilindrul este străbătut de un ax fie din lemn, fie din metal cu diametrul mic pe care sînt înfășurate două sfori subțiri și apoi totul suspendat de punctele $A$ și $B$, solidare cu o grindă, de exemplu. Experiența se efectuează astfel: se rotește cilindrul în așa



fel ca sfoara să se înfășoare pe ax. Dar, înfășurîndu-se sfoara, cilindrul se ridică și în momentul cînd a ajuns în poziția cea mai de sus el are energie potențială maximă. Lăsat liber, cilindrul coboară și sfoara desfășurîndu-se, el se rotește continuu; deci are și o energie de rotație. Însă, coborînd, energia potențială se transformă treptat în energie cinetică. Luînd ca nivel de referință nivelul cel mai de jos atins de cilindru, vom spune că în această stare energia lui potențială devine zero, iar energia cinetică trece printr-o valoare maximă. Însă cilindrul nu se oprește aici, ci — datorită inerției — își continuă mișcarea ridicîndu-se, deci mișcîndu-se, înspre poziția cea mai de sus. Acum energia cinetică scade și crește energia potențială. În poziția cea mai de sus cilindrul are iarăși energie potențială maximă și energie cinetică nulă, și procesul reîncepe. Dacă ar lipsi complet frecările, mișcarea ar continua la nesfîrșit[1]. În cazul în care frecările sînt foarte mici, cilindrul se ridică de fiecare dată aproape la același nivel, ceea ce dovedește transformarea reciprocă a celor două forme de energie, iar mișcarea durează destul de mult pînă ce revine la starea de repaus.

Energia este o mărime fizică ce caracterizează starea unui corp sau a unui sistem de corpuri. Aceasta înseamnă că fiecărei stări, prin care trece corpul (sistemul fizic) sau sistemul de corpuri, îi corespunde întotdeauna o energie și că, atunci cînd trece de la o stare la alta, energia variază cu o cantitate egală cu diferența energiilor corespunzătoare acestor stări. De aceea se spune că *energia este o mărime fizică de stare.*

*Concluzii:*

1) Energia mecanică este o mărime fizică de stare.

2) Legea conservării energiei mecanice nu a fost contrazisă pînă cum de nici o observație făcută asupra naturii. Totuși, au fost situații în istoria fizicii cînd această lege părea că este violată. Dar la o mai atentă analiză a faptelor s-a văzut că legea este valabilă.

3) Legea conservării energiei mecanice, însă, face parte dintr-o lege foarte generală de conservare a energei, care

[1] Atragem atenția cititorului că nu trebuie să creadă că în aceste condiții sistemul ar constitui un perpetuum mobile. De ce? lăsăm pe cititor să răspundă.

arată că *energia totală — indiferent de natura ei — se conservă totdeauna*. Așa cum am văzut la momentul oportun, în transformările de energie, de exemplu la transformarea din energie mecanică în energie internă sau din energie mecanică în energie electrică, se măsoară variațiile de energie prin intermediul lucrului mecanic, pentru că în transformările menționate și, prin extensie, în toate transformările de energie, apar forțe care produc lucru mecanic.

Lucrul mecanic, însă, este — așa cum se știe — o *mărime fizică de proces*, depinzînd *nu* de starea sistemului fizic la un moment dat, *ci de evoluția* lui (a sistemului), de transformările succesive pe care le suferă sistemul fizic.

Legea conservării energiei are multiple aplicații. Ele sînt studiate pe larg în cursul liceului și, de aceea, nu ne vom opri asupra lor.

În mecanica relativistă, energia totală a unei particule sau a unui sistem de particule aflat într-un referențial inerțial este compusă din: *energia de repaus* $m_0c^2$, *energia cinetică* $\frac{1}{2}m_0v^2$ și *energia potențială* $E_p$. Se observă că aici, spre deosebire de mecanica clasică, apare energia de repaus ($m_0c^2$). De aceea, în mecanica relativistă, legea conservării energiei totale mecanice se va formula astfel: *într-un sistem de referință inerțial, energia totală mecanică a unei particule sau sistem de particule este constantă*. Expresia matematică a acestei legi este

$$E = m_0c^2 + \frac{1}{2}m_0v^2 + E_p = \text{const.} \qquad (177)$$

Relația (177) arată că pentru a face să crească masa de repaus cu o cantitate $\Delta m_0$ trebuie să se consume o cantitate de energie de repaus $\Delta E_0 = c^2\Delta m_0$. În cazul în care masa de repaus ar scădea cu o cantitate $\Delta m_0$, energia de repaus ar scădea și ea cu $\Delta E_0 = c^2\Delta m_0$, iar energia cinetică sau energia potențială ar trebui să crească, deoarece energia totală trebuie să rămînă constantă. Așadar avem

$$\Delta E_0 = c^2\Delta m_0. \qquad (178)$$



Formula (178) a revoluționat întreaga lume științifică și poartă numele lui Einstein — *formula lui Einstein*. Ea a fost însă, interpretată eronat de către unii fizicieni și filozofi idealiști, care considerau că aceasta exprimă faptul că „materia se transformă în energie". Așa cum știm în prezent, energia este o formă de manifestare a materiei.

Cu ajutorul formulei (178) s-a putut evidenția imensa cantitate de energie pe care o conține materia. Pentru a înțelege mai bine aceasta să exemplificăm. De pildă, să calculăm energia care este asociată unui kilogram de substanță. Aplicînd formula (178) vom scrie $E_0 = c^2m_0 = (3\cdot10^8)^2\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}\cdot 1\text{ kg} = 9\cdot10^{16}\text{ kg}\cdot\text{m/s}^2\cdot\text{m} = 9\cdot10^{16}$ J. Cum $1\text{ J} = \frac{1}{3{,}6\cdot10^6}$ kWh, rezultă $E_0 = \frac{9\cdot10^{16}}{3{,}6\cdot10^6}$ kWh $= 2{,}5\cdot10^{10}$ kWh. Această energie corespunde lucrului mecanic ce ar trebui efectuat pentru a ridica la înălțimea de 300 metri, față de nivelul solului, un corp cu masa de 30 miliarde de tone.

Din (178) avem

$$\Delta m_0 = \frac{\Delta E_0}{c^2} \qquad (179)$$

și

$$E - E_0 = c^2(m - m_0).$$

Facem mențiunea că formula (178), fiind valabilă pentru o particulă sau un sistem de particule, este valabilă și pentru un corp sau pentru sisteme de corpuri. Conform relației (179), cînd un corp sau un sistem de corpuri suferă o transformare în care se produce o variație de energie, masa lui variază cu cantitatea dată de această formulă.

Formula lui Einstein nu poate fi verificată experimental la nivel molecular, deoarece variația masei este neglijabil de mică (de ordinul $10^{-12}$ kg), datorită valorii prea mici a energiilor care intervin în acest caz.

Știm că o moleculă de apă este alcătuită din 2 atomi de hidrogen și 1 atom de oxigen. Aceasta înseamnă că dacă am folosi 2 grame de hidrogen și 16 grame de oxigen în stare gazoasă ar trebui să se obțină 18 grame de apă. În realitate, însă, se obțin numai 17,999999997 grame. Diferența 18 —17,999999997 = 0,000000003 grame reprezintă, evident,

masa ponderală și, așa cum se observă este neglijabil de mică. O astfel de cantitate nu poate fi cîntărită cu nici una dintre balanțele existente în prezent, oricît de sensibilă ar fi ea.

Spuneam mai sus că formula (178) a fost interpretată eronat de către unii fizicieni și filozofi idealiști, în sensul că ei credeau și afirmau că masa se transformă în energie și în acest fel materia se pierde. Dar, așa cum de asemenea am arătat, este vorba numai de o *echivalență dintre masă și energie* și deci *nu* se poate vorbi de o dispariție a materiei. Un exemplu ne va lămuri mai bine această problemă Să presupunem că un atom de litiu ($^{7}_{3}$Li), a cărui masă atomică este 7,018 u, este bombardat cu un proton ($^{1}_{1}$H) a cărui masă atomică este 1,008u (unități atomice de masă), reacție care se scrie

$$^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} = 2\,{}^{4}_{2}\mathrm{He} + \mathrm{E};$$

rezultă 2 particule $\alpha$ (adică două nuclee de heliu) și energia nucleară $E$. Însă aceste două particule au masa atomică $2 \cdot 4{,}004 = 8{,}008$u, iar atomul de litiu împreună cu protonul au masa 8,026 u. Se observă că lipsește cantitatea: 8,026 — —8,008 = 0,018 u, denumită *„defect de masă"*. Această masă lipsește numai aparent, deoarece ea se regăsește intactă în particulele $\alpha$ care rezultă în urma bombardamentului, întrucît aceste particule au viteza foarte mare și deci și o masă de mișcare mare. Diferența dintre masa de mișcare a acestor particule și masa de repaus este exact egală cu defectul de masă, adică cu 0,018. Așadar, încă o dată precizăm, materia nu dispare.

Legea conservării energiei este aplicabilă și reacțiilor nucleare, astfel că energia totală înainte de transformările suferite de către particulele elementare este egală cu energia particulelor care rezultă după transformările ce au avut loc.

Particulele elementare, aflate în stare de repaus au energia dată de (178), în care $m_0$ este masa particulei elementare în repaus. Notînd acum cu $m$ masa particulei cînd aceasta se află în stare de mișcare cu viteza $v$, relația dintre $m$ și $m_0$



este dată, după teoria relativității restrînse, de relația (49), iar energia particulei în mișcare este

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Dacă un grup de particule elementare se transformă în alt grup de particule elementare, transformare însoțită de emisie de fotoni $\nu$ a căror energie este $h\nu$, atunci legea conservării energiei se scrie

$$m_1 c^2 + h\nu_1 = m_2 c^2 + h\nu_2 = \text{const.}$$

## LEGEA CONSERVĂRII IMPULSULUI TOTAL AL UNUI SISTEM[1]

Adesea am auzit despre reculul armelor de foc, iar mulți dintre noi am simțit reculul armelor de tir, mai ales cînd am tras prima dată. Alții l-au simțit cînd au făcut trageri, pentru întîia oară, în timpul efectuării stagiului militar. Și tot atunci au observat reculul tunurilor. De asemenea, am luat cunoștință, prin intermediul presei sau a radioteleviziunii, despre zborurile rachetelor care au plasat sateliți artificiali ai Pămîntului, sau stații orbitale sau primii oameni, ori roboți (lunamobilul, de exemplu), pe suprafața satelitului natural al Terrei, Luna.

Reculul armelor de foc, ca și zborul rachetelor, al avioanelor cu reacție se explică cu ajutorul legii conservării impulsului total al unui sistem și se poate evidenția prin următoarea experiență simplă. O eprubetă cu apă închisă cu dop o suspendăm cu ajutorul a două fire de ață ca în figura 122.

[1] Legea conservării energiei totale exprimă uniformitatea timpului, iar această lege exprimă omogenitatea spațiului.

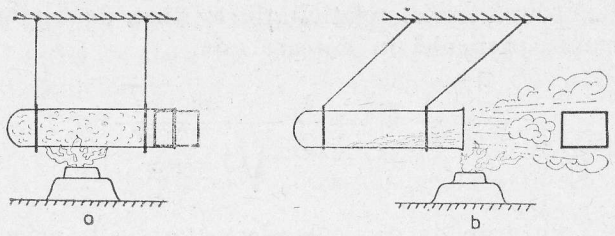



Fig. 122. Experiență ilustrînd existența reculului.

De eprubetă apropiem o flacără, de exemplu o spirtieră aprinsă. Vom observa că după aproximativ două minute de la declanșarea fierberii, dopul este aruncat (în exterior), iar eprubeta se deplasează în sens opus; fenomenul este acompaniat de zgomot. Vom spune că presiunea vaporilor de apă acumulați în spațiul dintre dop și apă determină deplasarea celor două corpuri, dop-eprubetă, sau că acționează atît asupra dopului, cît și asupra eprubetei, forțe de presiune egale. (În cazul armelor de foc, în locul vaporilor de apă acționează gazele dezvoltate în urma arderii prafului de pușcă.) Se observă, însă, ceva care pare curios la prima vedere. De pildă, cînd se face o tragere cu un tun. Tunul efectuează o deplasare cu o viteză nu prea mare, în timp ce obuzul se mișcă cu o viteză și pe o distanță foarte mare. Curiozitatea de care vorbeam se referă la faptul că deși forțele care acționează asupra tunului și obuzului sînt egale și de sens opus, deplasările și respectiv vitezele corpurilor, tun-obuz, sînt foarte diferite între ele.

Răspunsul la această curiozitate aparentă este extrem de simplu. Așa cum se cunoaște, legea a doua a dinamicii clasice arată că accelerația pe care o capătă un corp sub acțiunea unei forțe este invers proporțională cu masa sa sau, așa cum am arătat la pagina 144, forțe egale acționînd asupra corpurilor de mase neegale le imprimă acestora accelerații invers proporționale cu masele lor. Aceasta înseamnă că accelerația obuzului este de atîtea ori mai mare decît accelerația tunului de cîte ori este mai mare masa tunului decît masa obuzului. Dar cît timp durează accelerarea obuzului? Numai atît timp cît se mișcă în interiorul țevii. După



ieșirea din țeavă mișcarea se consideră uniformă, abstracție făcînd de frecarea cu aerul și de acțiunea forței gravitaționale. În realitate, însă, evident că mișcarea este întîrziată și se face după o traiectorie numită *balistică*. Pentru simplificare vom persupune că în timpul mișcării în interiorul țevii accelerația obuzului este constantă. La fel accelerația tunului. Așa fiind, vom scrie

$$v_1 = a_1 t \qquad \text{și} \qquad v_2 = a_2 t$$

de unde

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{a_1}{a_2} \quad \text{sau} \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{m_2}{m_1}. \tag{180}$$

Din (180) rezultă, vectorial,

$$m_1 \vec{v}_1 = -m_2 \vec{v}_2, \tag{181}$$

deoarece vectorii $\vec{v}_1$ și $\vec{v}_2$ au sensuri contrare. $\vec{v}_1$ este viteza obuzului, iar $\vec{v}_2$ viteza de recul a tunului; $m_1$ și $m_2$ sînt, respectiv, masa obuzului și masa tunului.

Produsele $m_1\vec{v}_1$ și respectiv $m_2\vec{v}_2$ se numesc *impulsul* obuzului și, respectiv, al tunului. Așadar, produsul dintre masa unui corp și viteza sa se numește *impuls* al acelui corp[1] și se notează cu $\vec{p}$.
Deci

$$\vec{p} = m\vec{v}. \tag{182}$$

Folosind legea a doua a lui Newton vom scrie

$$\vec{F}\,\mathrm{d}t = \mathrm{d}\vec{p}$$

și prin operațiunea de integrare, se obține

$$\int_{t_0}^{t} \vec{F}\,\mathrm{d}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0. \tag{183}$$

[1] Amintim cititorilor că impulsul caracterizează starea corpurilor din punct de vedere dinamic, în timp ce viteza caracterizează starea din punct de vedere cinematic.

Primul membru al egalității se numește *impuls total* al forței.

Relația (183) exprimă *legea impulsului*[1]. În cazul cînd forța $\vec{F}$ este constantă, expresia (183) se scrie sub forma

$$\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0. \tag{184}$$

Dacă intervalul de timp cît acționează forța este foarte scurt, atunci mărimea $Ft$ sau $F\,dt$ se numește *percuție*. Relația (184) arată că *produsul dintre forță și timp* (cînd este cazul, percuția) *este egal cu variația impulsului.*

Revenind la relația (181) vom scrie

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = 0 \tag{185}$$

În cazul în care tragerea s-ar efectua într-un spațiu lipsit de aer, adică cu un tun suspendat în vid, mișcarea celor două corpuri tun-obuz ar dura la nesfîrșit, cu viteza $\vec{v}_1$, respectiv $\vec{v}_2$; bineînțeles obuzul și tunul se vor deplasa în sensuri contrare.

În relația (185) trebuie să înțelegem prin $\vec{v}_1$ și $\vec{v}_2$ vitezele în momentul imediat următor tragerii, deoarece ulterior asupra obuzului și tunului vor acționa frecarea cu aerul, forța gravitațională și, în plus, asupra tunului, acționează și rezistența solului.

Să ne imaginăm acum un tun instalat pe un vagon-platformă de cale ferată și că se fac trageri din mers. Relația (185) o vom scrie acum

$$m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2 = 0. \tag{186}$$

Aici $\vec{u}_1$ și $\vec{u}_2$ reprezintă viteza obuzului și respectiv a tunului față de vagonul aflat în mișcare cu viteza $\vec{v}$. Pentru un

[1] Denumită de unii autori „teorema impulsului".



observator aflat într-un sistem de referință legat de Pămînt, vitezele obuzului și al tunului vor fi[1]

$$\vec{v}_1 = \vec{u}_1 + \vec{v} \text{ și } \vec{v}_2 = \vec{u}_2 + \vec{v}, \tag{187}$$

unde $\vec{v}_1$ este viteza obuzului în raport cu observatorul de pe sol, iar $\vec{v}_2$ viteza de recul a tunului în raport cu același observator.

Din (187) scoatem pe $u_1$ și $u_2$ și îi introducem în (186). Vom avea

$$(m_1 + m_2)\vec{v} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 \tag{188}$$

în care $m_1 + m_2$ reprezintă masa totală (tun + obuz) înainte de tragere, care se deplasează cu aceeași viteză, $\vec{v}$, pe care o are vagonul-platformă față de sol. Aceasta înseamnă că înainte de tragere impulsul total al obuzului și tunului este $(m_1 + m_2)\vec{v}$, adică chiar membrul întîi al relației (188); în membrul al doilea, însă, avem suma impulsurilor obuzului și tunului, după tragere. Cu ajutorul acestui exemplu am demonstrat o altă lege fundamentală din mecanică și în același timp lege a naturii, numită *legea conservării impulsului total al unui sistem.*

Să presupunem acum că două corpuri cu masele $m_1$ și $m_2$ au vitezele $\vec{v}_{01}$ și $\vec{v}_{02}$ și că, în urma unei interacțiuni (ciocnire centrică, de exemplu) vitezele devin $\vec{v}_1$ și respectiv $\vec{v}_2$.

În acest caz, legea conservării impulsului se scrie

$$m_1\vec{v}_{01} + m_2\vec{v}_{02} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = \text{const.}$$

sau

$$\Sigma(m\vec{v})_0 = \Sigma m\vec{v} = \text{const.} \tag{189}$$

În acest caz vom spune că *într-un sistem izolat suma vectorială a impulsurilor inițiale nu poate fi modificată de*

[1] Obuzul se mișcă în sens contrar mișcării vagonului.

*interacțiuni interne, ci se menține constantă.* Această lege este valabilă și în cazul cînd cele două corpuri considerate au direcții de mișcare diferite, adică atunci cînd ciocnirea *nu* este centrică (centrele de simetrie ale corpurilor nu se deplasează după aceeași direcție) (fig. 123 a, b). Folosind

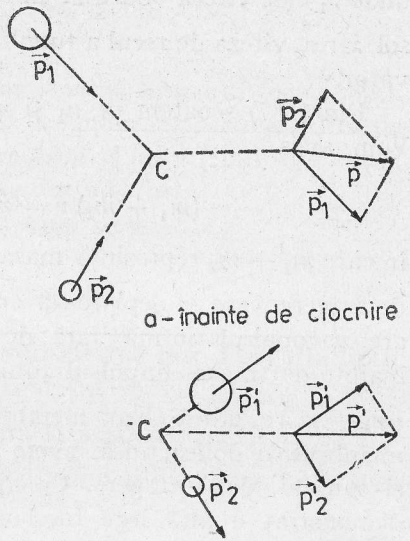



Fig. 123. Ciocnirea neeentrică.

relația (189) și notațiile din figură, vom scrie (*C* reprezintă locul în care se produce fenomenul ciocnirii)

$$\Sigma\vec{p} = \Sigma\vec{p}'$$

sau

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2$$

de unde

$$\vec{p}'_1 - \vec{p}_1 = -\vec{p}'_2 + \vec{p}_2 = -(\vec{p}'_2 - \vec{p}_2)$$

care se mai scrie

$$\Delta\vec{p}_1 = -\Delta\vec{p}_2 \qquad (190)$$



în care $\Delta\vec{p}_1$ reprezintă variația impulsului primului corp, iar $\Delta\vec{p}_2$ este variația impulsului celui de al doilea corp. Relația (190) ne spune că variațiile impulsului, corespunzător celor două corpuri, sînt egale și de semne contrare, ceea ce înseamnă că impulsul „pierdut" de un corp, ca urmare a interacțiunii, este „cîștigat" de celălalt corp. (Se poate spune că a avut loc un transfer de impuls.)

Dacă cele două corpuri au $v_{01} = v_{02} = 0$, atunci se obține relația (185).

Am demonstrat legea conservării impulsului pentru cazul a două corpuri. Însă ea este valabilă pentru oricîte corpuri, important fiind faptul ca sistemul de corpuri să fie izolat (și, evident, lipsit de frecări). Pentru $n$ corpuri relația (189) devine

$$\sum_{i=1}^{n} m_i v_i = \text{const.} \qquad (191)$$

Aceasta este *expresia matematică*, generală, a *legii conservării impulsului total al unui sistem*, lege foarte importantă a naturii, care este valabilă în cazul sistemelor izolate de corpuri sau, cum se mai spune, în cazul sistemelor închise, adică sisteme de corpuri asupra cărora nu acționează nici un fel de forțe din exterior.

Obuzul și tunul luate împreună se comportă în timpul tragerii ca un sistem fizic închis, cu toate că asupra lor acționează forța gravitațională. Și asta pentru că durata tragerii este foarte mică, iar greutatea obuzului și chiar al tunului este mică în comparație cu forța de presiune dezvoltată de gazele rezultate din arderea pulberii (prafului de pușcă). Așa fiind, fenomenul reculului se va desfășura după aceleași legi fie că tragerea are loc pe Pămînt, fie într-o rachetă care se deplasează în spațiul interplanetar sau interastral.

Dacă forțele de interacțiune dintre corpurile (particulele) care formează sistemul închis le denumim *forțe interioare (interne)*, atunci legea conservării impulsului o vom formula astfel: *un sistem izolat (închis) nu-și poate modifica impulsul*

*total sub acțiunea forțelor sale interioare*[1]. Evident că diferitele părți ale sistemului se vor pune în mișcare una față de alta, dar creșterea impulsului unei părți sau a unui corp din sistem este compensată exact de scăderea impulsului celeilalte părți sau celuilalt corp cu care se află în interacțiune. Să dăm un exemplu și anume să ne gîndim la deplasarea unei locomotive și să vedem cum se explică ea (deplasarea). În cilindrul cu piston pătrund vapori care, destinzîndu-se, acționează asupra pistonului și acesta, prin intermediul altor piese (bielă-manivelă), acționează asupra unor roți. Dacă ne-am imagina locomotiva suspendată ne-am da seama că forța de presiune a vaporilor nu este suficientă pentru a o mișca, căci în acest caz, într-adevăr, locomotiva ar sta nemișcată, ea fiind complet izolată și deci sub acțiunea forțelor sale interioare nu-și poate schimba starea. Fiind însă pe șine, forța de frecare care se manifestă între roți și șine reprezintă forța exterioară care determină mișcarea. Cum? Iată: impulsul forței imprimat de locomotivă șinelor este egal și de sens contrar cu impulsul forței pe care șinele îl imprimă locomotivei și astfel are loc mișcarea acesteia. Viteza pe care o capătă șinele, care sînt montate pe Pămînt și deci de către Pămînt, este neglijabilă, din cauza masei enorme a Pămîntului în comparație cu masa locomotivei. Că e așa, ne putem convinge ușor, imaginîndu-ne, sau făcînd chiar, următoarea experiență. Pe o mică platformă, ușor mobilă (fig. 124), așezăm un automobil-jucărie, după ce în prealabil am încordat arcul. Lăsînd liber automobilul vom observa că în timp ce acesta se mișcă (de exemplu, spre stînga cum privim desenul), platforma, care inițial era în repaus, se mișcă în sens opus. Așadar, automobilul, prin

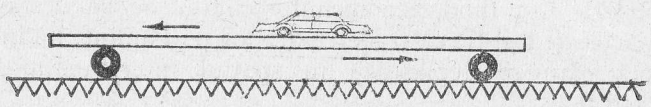


Fig. 124. Pentru explicarea mersului oamenilor, al autovehiculelor, al animalelor.

[1] Legea conservării impulsului total al unui sistem a fost întrevăzută de către René Déscartes (1596—1650), filozof, fizician și matematician francez.



rotițe, imprimă platformei un impuls, iar aceasta răspunde cu un impuls egal și contrar, ca sens. Platforma, avînd masa comparabilă cu a autoturismului-jucărie, mișcarea ei se observă. În mod analog se explică mersul oamenilor și al animalelor. De pildă, un om împreună cu Pămîntul formează un sistem izolat. Cînd omul merge imprimă Pămîntului cîte un impuls, dat cu fiecare pas făcut; sensul acestui impuls este înspre spate. Pămîntul răspunde cu un impuls egal și contrar ca sens, rezultatul fiind mișcarea omului. Cînd omul se găsește pe polei, legătura om-pămînt este neglijabil de mică și omul devine el însuși un sistem izolat. În acest caz $\Sigma m\vec{v} \simeq 0$ și, de aceea, omul nu se poate deplasa decît foarte anevoios. Dacă suprafața pe care se află, precum și tălpile ar fi perfect lustruite atunci $\Sigma m\vec{v} = 0$ și deplasarea ar fi imposibilă, sau dacă ar primi un impuls din exterior s-ar mișca oricît de mult dacă suprafața ar fi nesfîrșită ca întindere. În momentul cînd întîlnește, însă, un corp cu masa mai mare, astfel ca împreună să formeze un sistem, atunci poate intra în stare de repaus.

Tot astfel se explică de ce un om nu se poate ridica atunci cînd se trage singur de păr! Sub acțiunea forțelor sale interioare, omul — considerat ca un sistem izolat — nu-și poate schimba starea.

Să ne imaginăm un om care stă pe un cîntar și are într-o mînă un obiect. Vom observa că atunci cînd face gestul de a arunca obiectul în sus, cîntarul indică o valoare mai mare, deoarece omul imprimă obiectului un impuls către în sus, iar obiectul acționează asupra omului cu un impuls egal și de sens opus. Cum $m = \frac{p}{v}$, aceasta se va adăuga la masa $M$ a omului $(M + m)$. În cazul că omul face gestul de a arunca obiectul în jos, atunci impulsul cu care răspunde corpul este dirijat în sus și atunci cîntarul arată o masă mai mică $(M - m)$.

Cînd tragem cu o pușcă, simțim, dacă arma nu e bine fixată pe umăr, acțiunea recului. Explicația, acum, este simplă. La fel de ușor se explică fenomenul de recul în cazul experienței cu eprubeta.

Din formula (184) scoatem, cînd $v_0 = 0$, $v = \frac{Ft}{m}$. Aceasta explică următorul lucru: dacă vrem ca un obiect aruncat să ajungă cît mai departe, atunci trebuie să facem ca forța musculară să acționeze un timp mai îndelungat asupra obiectului cum sau se spune popular, trebuie „să-i facem vînt" obiectului; (dacă $t$ crește, atunci crește și $v$).

Legătura dintre viteză și timpul de acțiune este foarte bine cunoscut de către unii sportivi, numai că ei cunosc aceasta — de regulă — din practică.

Cunoaștem foarte bine, din practică, ce se întîmplă atunci cînd ne lovește un obiect tare. Dacă lovitura este la cap, efectul ei este simțit puternic, deoarece timpul cît are loc frînarea obiectului este foarte scurt și deci $F = \frac{mv}{t}$ este foarte mare. Dacă, în plus, și $v$ va fi mare, $F$ va fi și mai mare.

În figura 125 se arată mașina cu jeturi de aburi inventată de către Heron și a cărei funcționare se explică cu ajutorul legii conservării impulsului total al unui sistem. Desigur, cititorul este acum în măsură să dea această explicație.

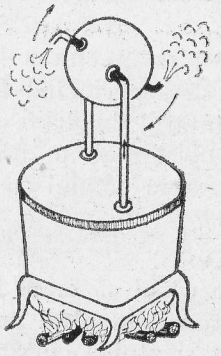


Fig. 125. Turbina cu vapori a lui Heron.

În figura 126 se dă o experiență simplă care poate fi făcută de oricare dintre cititori. Așa cum se vede, dispozitivul constă dintr-o pîlnie obișnuită la care se adaptează un furtun cu lungimea de aproximativ 0,5 m; sistemul astfel format se suspendă pe un stativ. Furtunul are la



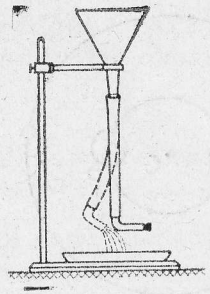


Fig. 126. O experiență în legătură cu legea conservării impulsului.

partea inferioară un cot prevăzut cu un dop. Se toarnă apă în pîlnie și apoi se scoate dopul. Se observă că, în timp ce apa curge, furtunul ia poziția reprezentată în desen cu linie întreruptă. Explicația se dă pe baza aceleiași legi. O lăsăm pe seama cititorului.

Vectorul impuls total al unui sistem are punctul de aplicație în centrul de masă al sistemului, iar starea de mișcare a centrului de masă a unui sistem închis[1] nu se modifică[2] sub acțiunea forțelor interioare. Așa fiind, *legea conservării impulsului total al unui sistem* se mai poate formula și astfel: *într-un sistem izolat, starea de repaus sau de mișcare a centrului de masă (de greutate) al sistemului nu se modifică sub acțiunea impulsurilor datorită acțiunilor interne.*

Să dăm exemple în acest sens. Se știe că Luna se mișcă în jurul Pămîntului, fiind satelit al acestuia. Pe dreapta care unește Pămîntul cu Luna se află centrul de masă $C$ al sistemului $P$—$L$ (fig. 127). Acest centru de masă nu-și schimbă poziția și, ca atare, Pămîntul și Luna au o mișcare de rotație în jurul lui fără să se modifice mișcările lor proprii. Exactitatea acestei concluzii a fost verificată în repetate rînduri prin observații astronomice. Cele spuse rămîn valabile pentru orice corpuri și oricît de mare ar fi numărul lor. De pildă, cînd un obuz explodează în aer, pe traiectoria

[1] Un sistem fizic este închis (izolat) atunci cînd suma vectorială a forțelor exterioare ce acționează asupra sa este nulă.

[2] Modificarea stării de mișcare a unui corp (sistem) constă fie în schimbarea mărimii vitezei sau direcției vitezei, fie în oprirea lui.

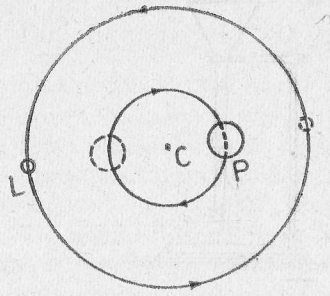



Fig. 127. Mișcarea Lunii și a Pămîntului în jurul centrului de masă comun.

sa bucățile rezultate capătă fiecare cîte un impuls, dar în așa fel încît suma vectorială a impulsurilor este nulă (înaintea exploziei bucățile formau un tot și viteza fiecărei bucăți față de obuz era zero, iar după explozie fiecare parte a căpătat o anumită viteză față de proiectil). Însă centrul de masă[1] al ansamblului bucăților, al sistemului, își continuă mișcarea pe curba balistică independent de direcția sau sensurile în care se deplasează bucățile. Așadar, acțiunea exploziei nu modifică traiectoria balistică a proiectilului.

În fine, să ne imaginăm o muscă pe un pai ce plutește pe suprafața unei ape. Cînd musca se deplasează pe pai imprimă acestuia un impuls, iar acesta răspunde cu un impuls egal și de sens contrar. Ca urmare, centrul de masă comun își continuă mișcarea inițială, dacă paiul se află în mișcare, sau rămîne pe loc dacă paiul se afla în repaus.

La fel se petrec lucrurile atunci cînd un om se deplasează în lungul unei bărci sau cînd omul sare din barcă pe mal.

Legea conservării impulsului total al unui sistem se aplică la studiul ciocnirilor corpurilor, plastică și elastică. Nu ne vom opri asupra acestei probleme, deoarece este dezvoltată suficient în manualele de liceu.

Legea conservării impulsului total al unui sistem este valabilă și în teoria relativității și are următoarea formulare: *impulsul total al unui sistem de puncte materiale destul de depărtate de orice alte puncte materiale este constant.* Expresia matematică este

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^{n} m_i \vec{v}_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{m_{0i}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \vec{v}_i = \text{const.}$$

De asemenea, legea conservării impulsului total al unui sistem este valabilă și în cazul sistemelor microscopice ale căror particule sînt în interacțiune, ca sisteme de atomi, de molecule, de nuclee, de particule elementare.

Această lege de conservare este valabilă în mecanica cuantică cu toate că impulsul nu mai este egal cu $m\vec{v}$. Și asta pentru că nu se poate defini exact noțiunea de viteză. Dacă sistemul este alcătuit din puncte materiale atunci impulsul păstrează forma cunoscută ($\vec{p} = m\vec{v}$). Cînd, însă, sistemul este format din particule[1], care se comportă ca unde, impulsul se măsoară prin numărul de unde pe centimetru, fiind cu atît mai mare cu cît este mai mare numărul de unde pe centimetru. Legea conservării își păstrează totuși valabilitatea.

Analizînd cu atenție legea conservării impulsului total al unui sistem conchidem că: *în absența oricăror forțe exterioare impulsul total al unui sistem rămîne constant.* Ați intuit probabil: această concluzie reprezintă o formulare a *legii inerției*, lege fundamentală în fizică. Așadar, *legea inerției este o lege de conservare*, și anume *legea conservării impulsului total al unui sistem.* Legea inerției este valabilă în toate cazurile menționate mai sus și se poate exprima foarte simplu prin relația

$$\vec{p} = \text{const.}, \qquad (193)$$

valabilă, evident, numai în sisteme de referință inerțiale. Legea inerției se mai poate formula și astfel: *într-un sistem*

[1] Ansamblul bucăților se mișcă în cîmpul gravitațional terestru.

[1] Prin particulă trebuie să înțelegem aici o parte foarte mică de substanță avînd dimensiuni atomice sau subatomice și care se comportă ca un întreg în interacțiunea sa cu un sistem fizic.

*de referință inerțial un punct material (o particulă sau un sistem) izolat(ă), destul de depărtat(ă) de toate celelalte puncte (particule sau sisteme) se poate găsi fie în repaus, fie în mișcare* rectilinie *uniformă*. Se mai poate formula și astfel: *într-un SRI accelerația unui punct material (sistem) izolat este nulă*. Oricare din aceste definiții exprimă faptul că punctele materiale (sistemele) izolate tind să-și mențină starea lor de repaus sau de mișcare rectilinie uniformă și deci impulsul lor este constant. Aceasta înseamnă că într-un *SRI* un punct material (sistem) izolat, adică suficient de depărtat de toate celelalte puncte (sisteme), nu-și poate schimba starea de repaus sau de mișcare rectilinie uniformă dacă nu este constrîns de forțe din exterior. Cu alte cuvinte neintervenind forțe, punctul (sistemul) își conservă starea de repaus sau de mișcare rectilinie uniformă. Această proprietate sau, dacă vrem, această tendință a punctelor materiale (sistemelor de puncte) de a-și conserva starea de repaus sau de mișcare rectilinie uniformă se numește *inerție*, iar sistemele de referință în care valabilitatea legii inerției este admisă au fost numite sisteme de *referință inerțiale* sau, pe scurt, *sisteme inerțiale (SI)*. Se poate demonstra că sistemele de referință care se mișcă cu viteză constantă față de un referențial inerțial sînt și ele inerțiale și deci sistemele inerțiale sînt echivalente între ele.

În cadrul legii inerției nu există deosebire între un punct material (sistem) în repaus și un punct (sistem) în mișcare uniformă rectilinie. În această stare nu se pot găsi decît punctele (sistemele) care sînt în afara influenței altor puncte (sisteme) și, ca atare, ambele stări sînt mișcări „naturale". Aceste stări sînt posibile numai dacă atribuim punctelor materiale (sistemelor), sustrase influenței oricăror altor corpuri, proprietatea numită *inerție*. Așadar, prin inerție *vom înțelege proprietatea punctelor (sistemelor) de a-și menține neschimbată starea de repaus relativ sau de mișcare rectilinie uniformă atît timp cît nu sînt constrînse de alte puncte (sisteme) să-și modifice starea.*

Recomandăm acum cititorului să facă următoarea experiență: pe un pahar sau pe o cană să așeze un cartonaș, de mărimea unei cărți de joc și pe el o monedă de un leu sau de trei lei. Dacă trageți încet cartonașul, moneda îl urmează datorită frecărilor. Cînd, însă, smulgeți brusc cartonașul, moneda — în virtutea inerției — tinde să-și păstreze



starea sa și abia ulterior cade în pahar (cană) din cauză că dispare suportul. La fel se explică de ce dintr-un vraf de scînduri putem să extragem una dintre ele, cu condiția să o tragem brusc. Un alt exemplu. Pentru a fixa bine o pilă în mînerul ei putem proceda în două moduri și anume: imprimăm sistemului pilă-mîner o mișcare și apoi căutăm să-l oprim brusc lovind mînerul de un corp tare. Mînerul intră brusc în repaus, iar pila continuîndu-și starea de mișcare se fixează în mîner. Alt procedeu este următorul: ținem mînerul în mînă, pila înspre în jos, după ce în prealabil am introdus puțin pila, și lovim în el. Acesta intră brusc în mișcare, iar pila continuînd să-și mențină starea de repaus se înfige în mîner. Exemplele ar putea continua. Lăsăm aceasta în seama cititorului. Revenind la fenomenul ciocnirii corpurilor și folosind formula (190), vom scrie

$$\vec{F}_1 \Delta t = -\vec{F}_2 \Delta t$$

de unde

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2. \qquad (194)$$

Această relație ne spune că *forțele de interacțiune sînt egale și de semn contrar*. La această concluzie a ajuns Newton în urma efectuării experiențelor sale cu privire la conservarea impulsului, concluzie reprezentînd conținutul legii a treia a dinamicii clasice, formulată de către Newton astfel: *acțiunile reciproce a două corpuri sînt totdeauna egale și dirijate în sensuri contrare*[1] sau, cum formulăm astăzi: *fiecărei acțiuni i se opune întotdeauna o reacțiune egală și de semn contrar.*

Din conținutul acestei legi rezultă că acțiunea și reacțiunea, se manifestă totdeauna ca perechi de forțe. Aceasta înseamnă că legea se referă la forțele dintre două corpuri, cu toate că ar putea să interacționeze mai multe corpuri. Așa fiind, înseamnă că legea a treia a lui Newton poate fi utilizată pentru a demonstra legea conservării impulsului total al unui sistem. Într-adevăr, corpurile (particulele) care

[1] Vezi *Principiile matematice ale filozofiei naturale* de Isaac Newton, Edit. Academiei R.P.R., Buc. 1956, p. 37.

formează sistemul, interacționează, forțele acționînd ca perechi: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$. Aceasta înseamnă că și impulsurile sînt (perechi) egale și opuse ca semn. Însă, în timp ce impulsul unui corp (unei particule) descrește, impulsul celuilalt corp (celeilalte particule) crește cu o cantitate exact egală cu cantitatea cu care descrește impulsul primului corp (primei particule), astfel încît în interiorul sistemului (izolat) nu are loc o variație netă a impulsului total. Legea a treia a lui Newton fiind adevărată, înseamnă că impulsul total al sistemului se conservă.

De menționat faptul că și în cazul în care unele forțe nu sînt de natură newtoniană, impulsul total al sistemului se conservă.

Mai menționăm și faptul că cele două forțe — acțiunea și reacțiunea — nu au același punct de aplicație. În figura 128,a,b, se arată aceasta în două situații diferite.

Legea a treia a lui Newton, este o lege importantă în fizică și este independentă, ca și legea fundamentală a dinamicii. În unele cărți mai recente, legea a treia este numită: „teorema acțiunii și reacțiunii", deoarece poate fi demonstrată cu ajutorul legii inerției și a legii fundamentale a dinamicii, fiind o consecință a acestor legi.

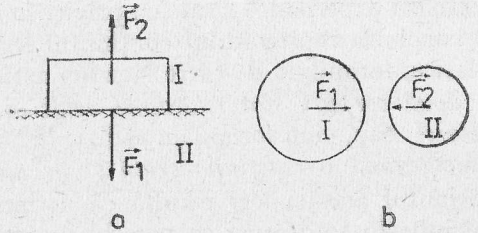



Fig. 128. Reprezentarea celor două forțe: *acțiunea* și *reacțiunea*.

Într-adevăr, considerînd cazul b din figura 128, vom scrie

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p} = \text{const.}$$

în orice moment, în ipoteza că nu are loc o altă interacțiune decît ciocnirea. Derivăm în raport cu timpul relația scrisă mai sus;



vom avea

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = 0 \quad \text{sau} \quad \frac{d\vec{p}_1}{dt} + \frac{d\vec{p}_2}{dt} = 0.$$

Aici $\frac{d\vec{p}_1}{dt} = \vec{F}_1$ și reprezintă forța cu care primul corp $C_1$ acționează asupra corpului $C_2$, iar $\frac{d\vec{p}_2}{dt} = \vec{F}_2$ reprezintă forța cu care corpul $C_2$ acționează asupra lui $C_1$. Deci

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0, \text{ de unde } \vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

Am obținut expresia, căutată, a legii a treia a lui Newton.

Și acum să ne amuzăm puțin cu Cyrano de Bergerac. Acesta și-a imaginat că am putea zbura pînă la Lună procedînd astfel: călătorul se urcă într-un cărucior din fier și aruncă o sferă magnetică pe direcția verticală, în sus, și aceasta va atrage căruciorul cu pasagerul în el. Ajungînd sfera din urmă, o va arunca din nou și iar va fi tras căruciorul și iar va arunca sfera ș.a.m.d. Numai că Bergerac, neavînd cunoștință de legea a III-a a dinamicii (a fost descoperită după cîteva decenii) sau legea conservării impulsului total al unui sistem, credea posibilă o astfel de călătorie. Să vedem dacă poate fi verosimil acest procedeu. De la școală ne amintim exemplul următor: cînd o persoană stă într-o barcă pe apă și aruncă pe mal un obiect constată că barca se deplasează în sens opus și deci se îndepărtează de mal. De ce? Fiindcă unei acțiuni îi corespunde întotdeauna o reacțiune egală și de sens opus sau, cu alte cuvinte, impulsului imprimat obiectului îi corespunde un impuls de sens opus imprimat de obiect sistemului om-barcă și astfel sistemul se depărtează de mal. Exact așa s-ar întîmpla și cu călătorul și sfera magnetică. Cînd ar arunca-o în sus, reacțiunea manifestată asupra căruciorului l-ar apăsa pe Pămînt și după scurt timp ambele corpuri, sfera și căruciorul, ar reveni la starea inițială.

Încheiem studiul legii conservării impulsului total al unui sistem menționînd faptul, foarte important, că pînă în prezent această lege nu a fost contrazisă; este deci o *lege fundamentală în fizică*. Atunci, însă, cînd se constată o aparentă violare a acestei legi, se procedează la o mai atentă analiză a faptelor, a fenomenelor, făcîndu-se uneori în acest

fel descoperiri nebănuite și, implicit, dovedindu-se nealterata valabilitate a legii conservării impulsului total. Așa au fost descoperite particulele elementare ca: neutronul, neutrinul, fotonul ș.a.

## LEGEA CONSERVĂRII MOMENTULUI CINETIC TOTAL AL UNUI SISTEM[1]

Desigur că cititorul se întreabă, imediat ce citește acest titlu, ce poate să însemne *moment cinetic*. De aceea, înainte de a aborda problema propusă, vom lămuri, succint, acest termen, care se mai utilizează și sub forma de *moment al impulsului*.

Fie o particulă de masă $m$ care se mișcă cu viteza $\vec{v}$ după o traiectorie în linie dreaptă. Produsul $m\vec{v} = \vec{p}$ se numește, așa cum am văzut, impulsul particulei.

Să presupunem acum că particula (punctul material) considerată este legată rigid de o axă de rotație $XX'$ și că sub acțiunea unei forțe tangențiale $F$ (fig. 129), punctul

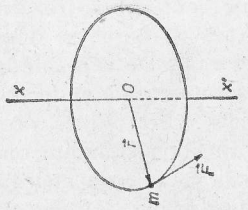



Fig. 129. Pentru demonstrarea impulsului momentului forței.

capătă impulsul $m\vec{v} = \vec{p}$. Fiind legat rigid de axa $XX'$, particula va căpăta o mișcare de rotație. Știind că la $t_0 = 0$, $\vec{v}_0 = 0$ și folosind relația (184), scrisă scalar ai cărei membri îi înmulțim cu $r$, vom scrie

$$Frt = mrv = m\omega r^2 \tag{195}$$

[1] Această lege exprimă izotropia spațiului.



deoarece $v = \omega r$. Aici produsul $Fr = M$ se numește *moment al forței* în raport cu punctul de referință $O$, $Mt$ *impulsul momentului forței*, $mr^2 = i$ este denumit *moment de inerție* al punctului material, iar $\omega$ este *viteza sa unghiulară*. Relația (195) se mai scrie

$$Mt = i\omega = k \tag{196}$$

unde $i\omega = k$ se numește *moment cinetic* al punctului material.

În cazul unui corp oarecare, punctele materiale care îl compun se găsesc fiecare la diverse distanțe față de axa de rotație $XX'$ ce trece prin $O$, dar toate au aceeași viteză unghiulară $\omega$. De aceea, relația (195) aplicată aici se scrie (fig. 130)

$$FRt = \omega(m_1r_1^2 + m_2r_2^2 + \ldots) = \omega\sum_{i=1}^{n} m_ir_i^2$$

sau

$$\mathcal{M}t = \omega\sum_{i=1}^{n} m_ir_i^2 = \omega I. \tag{197}$$

Aici $\mathcal{M}t$ este impulsul momentului forței ce acționează asupra corpului. În relația (197)

$$I = \sum_{i=1}^{n} m_ir_i^2 \tag{198}$$

se numește *moment de inerție (total) al corpului (sistemului)* față de axa de rotație aleasă. În cazul considerat aici, sistemul de puncte materiale alcătuiesc corpul și deci repre-

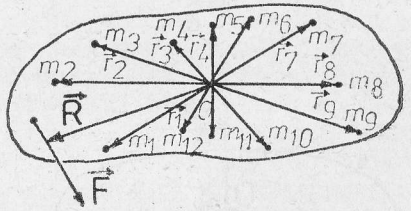



Fig. 130. Pentru demonstrarea impulsului momentului forței.

zintă un sistem fizic. Din relația (198) rezultă că *momentul de inerție al unui corp depinde de axa particulară în jurul căreia el se rotește, de forma corpului și de modul în care este distribuită masa sa*. Se demonstrează că momentul de iner-

ție al unei sfere în raport cu o axă care trece prin centrul ei este $I = \frac{2}{5} mR^2$, iar momentul de inerție al unei bare de lungime $l$ în raport cu o axă ce trece prin mijlocul ei și este perpendiculară pe lungimea ei, este $I = \frac{1}{12} ml^2$, iar dacă axa trece printr-un capăt al ei, $I = \frac{1}{3} ml^2$. Momentul de inerție se exprimă în kg · m². Expresia

$$\vec{K} = \omega \vec{I} \tag{199}$$

reprezintă *momentul cinetic total al sistemului (corpului)*. $K$ este un vector coliniar cu vectorul $\vec{\omega}$ și are același sens cu acesta (fig. 131).

Cele expuse aici pentru un corp rămîn valabile și pentru un sistem de corpuri. Într-adevăr, considerînd $t_0 \neq 0$ și $\omega_0 \neq 0$, relația (199) se poate scrie, ținînd seama și de (197),

$$\vec{\mathcal{M}} = \frac{\Delta(I\vec{\omega})}{t}. \tag{200}$$

Aceasta înseamnă că momentul forței este egal cu variația momentului cinetic împărțit la timpul în care are loc această variație.

Comparînd (195) cu (196) obținem

$$k = mrv = rp$$

care se mai scrie

$$\vec{k} = \vec{r} \times \vec{p}$$

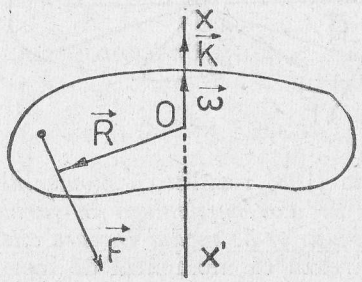



Fig. 131. Reprezentarea vectorilor moment cinetic total și viteză unghiulară.



sau $k = rp \sin (\widehat{\vec{r}, \vec{p}}) = rp \sin \varphi$ și se mai scrie (fig. 132)

$$k = [r \sin \varphi]\, p = r_\perp p$$

unde $r_\perp$ se numește *brațul impulsului* $\vec{p}$. Așa cum se vede pe figura 132 vectorul $\vec{k}$ este perpendicular pe planul format

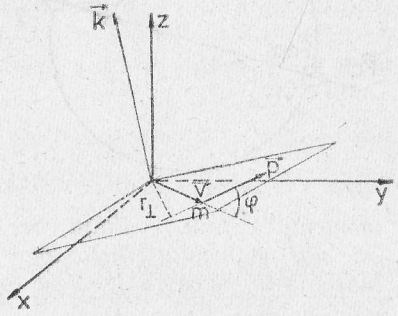



Fig. 132. Modulul vectorului momentul impulsului pentru o particulă de masă $m$ este dat de produsul dintre impulsul $p$ și brațul impulsului $r_\perp$.

de ceilalți doi vectori, $\vec{r}$ și $\vec{p}$; $\vec{r}$ este vectorul de poziție al particulei de masă $m$ față de originea $O$ a unui referențial inerțial, iar $\vec{k}$ este definit în raport cu originea acestui referențial.

Să ne imaginăm acum două corpuri de mase egale legate între ele printr-o sfoară. Aruncînd unul dintre corpuri, celălalt îl va urma și ansamblul va descrie o mișcare de rotație simultan cu mișcarea de înaintare. În ipoteza că se ține seama numai de cîmpul gravitațional al Pămîntului și că se face abstracție de ceilalți aștri, asupra celor două corpuri acționează forțe egale și direct opuse, de-a lungul sforii. Că e adevărat, ne convingem ușor. Să privim figura 133. Asupra corpului $C_1$ acționează forțele centrifugă și centripetă ($F_{cf_1}$ și $F_{cp_1}$), $F_{cf_1} = -F_{cp_1}$, iar asupra corpului $C_2$ acționează forțele $F_{cf_2}$ și $F_{cp_2}$, $F_{cf_2} = -F_{cp_2}$. Forțele $F_{cf_1}$ și $F_{cf_2}$ se comportă ca forțe de acțiune și reacțiune, ele fiind egale și de sensuri contrare. Cum brațele acestor forțe, în raport cu un punct oarecare, sînt egale, rezultă că și momentele acestor două forțe sînt egale, sensurile lor fiind însă opuse. Așa fiind, momentul rezultant al acestor forțe va fi egal cu zero. Dacă momentul rezultant este zero, conform relației (200) și variația momentului

cinetic este zero. Dar dacă variația momentului cinetic este zero, atunci momentul cinetic al sistemului considerat este constant. Acesta este conținutul *legii conservării momentului cinetic total al unui sistem* și o putem formula astfel: *Dacă*

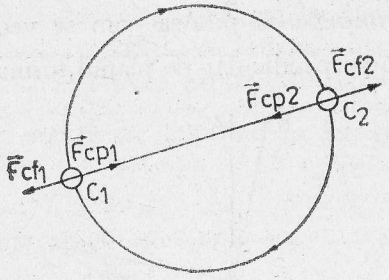



Fig. 133. În lipsa forțelor din partea altor aștri și a forței gravitaționale, asupra lui $C_1$ și $C_2$ în rotație acționează numai forța centrifugă și forța centripetă.

*momentul extern rezultant care acționează asupra unui sistem este nul, momentul cinetic total al sistemului rămîne constant*[1]. Matematic, această lege se exprimă prin relația

$$I_0\omega_0 = I\omega = \text{const.} \qquad (201)$$

Momentul cinetic, ca și impulsul, este o mărime vectorială caracterizată prin cele trei elemente importante: modul (mărime), direcție și sens. Or, legea conservării unei mărimi vectoriale arată că rămîne constant nu numai modulul, ci și direcția și sensul ei, adică rămîn constante cele trei componente ale vectorului pe trei direcții perpendiculare, una pe alta, în spațiu. Cum energia este o mărime scalară, rezultă că ar trebui să spunem că există șapte legi de conservare în mecanică, nu numai trei legi.

Trebuie să reținem că, întotdeauna, momentul cinetic se determină în raport cu un „centru" ales convențional și, desigur, se înțelege că valoarea momentului cinetic depinde de poziția acestui „centru". Dacă, însă, vom considera sistemul de corpuri ca formînd un tot și că se găsește în stare de repaus, ceea ce înseamnă că impulsul lui total este nul, atunci se poate demonstra că valoarea momentului cinetic nu depinde de poziția „centrului" ales convențional. În acest sens se folosește denumirea de *moment cinetic intern* al sistemului de corpuri considerat.

[1] Conținutul acestei legi se poate deduce și direct din relația (200).



Dacă luăm în considerare un sistem de corpuri care nu se mișcă în același plan, legea conservării momentului cinetic total se obține adunînd vectorial momentele cinetice ale corpurilor care alcătuiesc sistemul.

Legea conservării momentului cinetic se întîlnește și în fizica particulelor elementare. Se știe că orice particulă elementară posedă un *moment cinetic total* dat de relația

$$p_j = \sqrt{j(j+1)}\hbar \qquad (202)$$

unde $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, iar $j$ este numărul cuantic intern și ia valorile $(l \pm s) = \left(l \pm \frac{1}{2}\right)$ care definesc momentul cinetic total: orbital + de spin; $l$ este numărul cuantic orbital și $s$ numărul cuantic de spin. Relația care exprimă momentul cinetic total arată că nu sînt posibile decît acele transformări ale particulelor elementare în care momentul cinetic total variază cu un număr întreg de $\hbar$ sau este nul.

Legea conservării momentului cinetic total prezintă o seamă de consecințe și aplicații, multe dintre ele întîlnindu-se în viața cotidiană. Să ne imaginăm mai întîi o persoană stînd în picioare pe o platformă rotativă, denumită în fizică *scaunul lui Jukovski* (frecările sînt foarte mici) și să presupunem că la un moment dat persoana încearcă să-și imprime singură o mișcare de rotație față de un referențial legat de Pămînt; va reuși oare? Răspunsul este negativ, deoarece la orice încercare de a sa de a-și imprima o rotație, deci de a imprima platformei un moment cinetic (un impuls de rotație), conform legii de conservare a momentului cinetic total, platforma răspunde cu un moment cinetic de sens opus. Astfel, toate încercările rămîn fără rezultat și deci omul se menține în repaus.

Dăm persoanei de pe platformă o roată de bicicletă prevăzută cu mînere în lungul axului. Experimentatorul ține roata în așa fel încît planul acesteia să fie în planul vertical și o pune în mișcare de rotație, după care o aduce cu planul ei în plan orizontal; persoana, împreună cu platforma se pun în mișcare de rotație, în sens contrar sensului de mișcare al rotii, în acord cu legea conservării momentului cinetic total, persoana împreună cu platforma, constituind un sistem izolat. Dacă experimentatorul aduce roata cu planul ei în plan vertical, mișcarea lui și a platformei înce-

tează, chiar dacă mișcarea roții continuă. În fine, să presupunem că persoana aduce din nou roata cu planul ei în plan orizontal, dar în așa fel încît sensul ei de rotație să fie opus primului caz; platforma, împreună cu experimentatorul, se pun în mișcare de rotație în sens opus sensului de mișcare al roții. În primul și ultimul caz, roata în mișcarea sa imprimă sistemului experimentator-platformă un moment cinetic într-un sens, iar sistemul răspunde cu un moment cinetic egal și de sens contrar. Persoana trebuie să fie foarte atentă în timpul experienței, deoarece se ivește pericolul răsturnării ei. Într-adevăr, să privim figura 134, unde am notat cu $\vec{K}_0$ momentul cinetic inițial, transmis din exte-

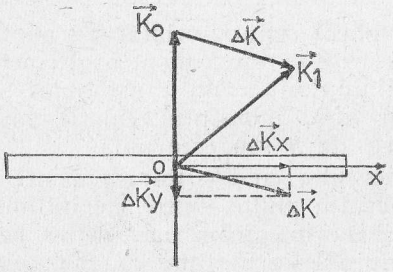



Fig. 134. Experiența cu roata de bicicletă.

rior roții, moment care trebuie să se conserve. În timpul cînd schimbă poziția roții, la înclinarea axului acesteia, momentul cinetic inițial are la un moment dat poziția $\vec{K}_1$. Diferența vectorială dintre $\vec{K}_1$ și $\vec{K}_0$ am notat-o cu $\Delta\vec{K}$. Considerăm originea acestui vector în punctul 0 și descompunîndu-l pe $\Delta\vec{K}$ după axele $Ox$ și $Oy$, ale unui sistem de axe rectangulare cu originea în 0, se obțin componentele $\Delta\vec{K}_x$ și $\Delta\vec{K}_y$. Prima componentă tinde să răstoarne persoana, iar cea de a doua imprimă sistemului mișcarea de rotație, așa cum se observă experimental. Cu alte cuvinte, putem spune că persoana de pe platforma rotativă acționează asupra roții cu un moment dat de relația (200), roata de bicicletă acționează asupra persoanei cu un moment egal și de sens contrar. Grație acestei interacțiuni, din interiorul sistemului, se produce variația momentului cinetic $\Delta\vec{K}$.

Luăm acum roata de bicicletă de la experimentator și în locul ei îi dăm să țină în fiecare mînă cîte un corp cu masa



de cîteva kilograme. Din exterior comunicăm sistemului experimentator-platformă un moment cinetic. Dacă persoana de pe platformă întinde brațele, lateral, în poziție orizontală, atunci momentul ei de inerție crește, iar viteza unghiulară a sistemului se micșorează. Dacă experimentatorul aduce apoi mîinile pe lîngă corp, în jos sau în sus, momentul de inerție scade, iar viteza de rotație crește. Această experiență ne va ajuta să înțelegem o serie de fapte, așa cum vom arăta mai departe, fapte pe care cei mai mulți dintre cititori le cunosc, dar nu și explicația lor. Așa de, pildă, am avut ocazia să vedem executîndu-se piruete de către unele persoane ca: patinatori, balerini, acrobați și alții. Explicațiile se dau pe baza conservării momentului cinetic total aplicat la sisteme izolate.

Să analizăm acum modul în care patinatorii, de exemplu, fac piruete. Așa cum se vede în figura 135, a, patinatorul mai întîi se apleacă pînă ce o jumătate din corpul său ia pozi-

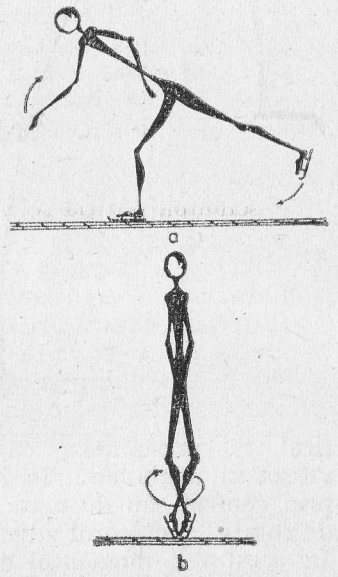



Fig. 135. Mișcările patinatorului pentru executarea piruetelor.

ție aproape orizontală și întinde mîinile lateral. Se sprijină apoi pe vîrful unei patine și cu celălalt picior își imprimă o mișcare de rotație în jurul axei verticale care trece prin vîrful patinei pe care se sprijină. După această operație,

imediat se ridică drept și răsucește picioarele unul peste altul, iar mîinile le aduce ca în figura 135, b, întinse în jos, pe lîngă corp, ori în sus paralel cu axa de rotație. În acest fel, momentul de inerție al corpului său se micșorează, deoarece $I \sim r^2$ (scade $r$), și conform relației (201), viteza unghiulară $\omega$ crește, deoarece produsul $I\omega$ trebuie să rămînă constant. Astfel patinatorul se rotește cu o viteză unghiulară mare. Cînd trebuie să se oprească, întinde brațele orizontal, ceea ce face ca momentul de inerție să crească și $\omega$ să scadă. Dacă depărtează puțin și picioarele, se oprește mai repede. La fel procedează balerinii, acrobații ș.a.

În figura 136 se arată mișcările pe care le execută un înotător atunci cînd sare de pe o trambulină. În momentul săriturii el își imprimă o mișcare de rotație într-un plan ver-

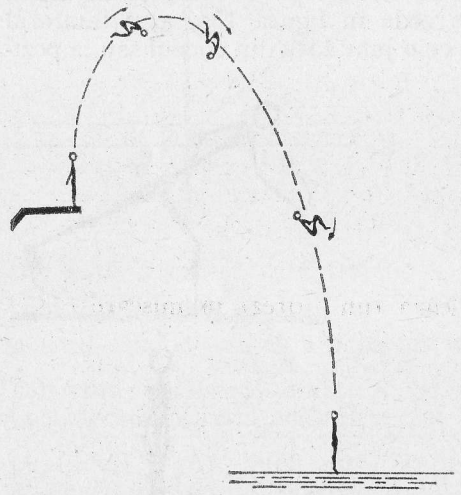


Fig. 136. Mișcările înotătorilor după ce sar de pe trambulină.

tical. Să presupunem că, în momentul începerii mișcării viteza sa unghiulară, în jurul unei axe orizontale ce trece prin centrul său de masă, este $\omega_0$. Pentru a-și mări viteza de rotație, înotătorul aduce genunchii și brațele către piept. În acest fel, momentul de inerție se micșorează, deoarece $I$ este direct proporțional cu pătratul distanței componentelor corpului pînă la axa de giratie, adică cu pătratul razei de rotație. Dar micșorîndu-se momentul de inerție, crește viteza unghiulară, fiindcă $I\omega = \text{const}$. Așa fiind, dacă înotătorul are suficient antrenament își poate regla viteza



$\omega$ în așa fel încît să intre în apă fie cu capul, fie cu picioarele. Dacă $\omega_0$ este cît mai mare și prin mișcarea genunchilor și brațelor își micșorează cît mai mult momentul de inerție, cu atît mai mult crește numărul de rotații pe care le face în aer, înainte de a intra în apă. Să presupunem că $\omega$ are o astfel de valoare încît înotătorul face, înainte de a intra în apă, o rotație. Dacă în același interval de timp vrea să facă două rotații, atunci va trebui să-și mărească viteza sa unghiulară de 2 ori, adică $\omega = 2\omega_0$. Folosind relația (201) obținem: $I = \frac{1}{2} I_0$. Așadar, înotătorul trebuie să-și strîngă genunchii și mîinile în așa fel încît momentul de inerție să se reducă la jumătate din valoarea momentului de inerție inițial.

În fine, un exemplu amuzant. Toată lumea știe că, întotdeauna, orice pisică, indiferent cum este lăsată să cadă liber, ea cade numai în picioare. Aceasta se datorește faptului că, în cădere, pisica răsucește coada într-un sens și, conform legii conservării momentului cinetic total, corpul ei — primind un impuls de rotație — se rotește în sens opus, pentru ca $I\omega = \text{const}$. Astfel, ea își reglează viteza unghiulară în așa fel încît să cadă în picioare. Acest fapt a dat naștere unei vorbe de duh: „E ca pisica: totdeauna cade în picioare!".

Să ne imaginăm o sfîrleză (un titirez) în mișcare de rotație și că încercăm să o răsturnăm. Nu vom reuși cu ușurință, deoarece ea are tendința de a-și menține neschimbată axa de rotație. Sfîrleza nu se răstoarnă nici atunci cînd axa ei este înclinată. Un fenomen asemănător are loc în cazul tunurilor. În interiorul țevii sînt niște ghinturi care imprimă proiectilului în timpul mișcării prin țeavă o mișcare de rotație, mișcare pe care acesta și-o conservă pînă ce ajunge la țintă. Dacă nu ar avea această mișcare de rotație, proiectilul „s-ar da peste cap" în aer. În plus, tunurile cu țeavă ghintuită trag la o distanță și cu o precizie incomparabil mai mare decît un tun cu țeava neghintuită. Explicația este evidentă.

În navigația pe apă sau aeriană se folosește un aparat de o construcție specială numit *orizont artificial* și care constă dintr-un giroscop sau o sfîrleză care se învîrtește foarte repede. Cu ajutorul acestui aparat navigatorul, piloții pot ști în orice moment care este poziția reală a navei (vapor

sau avion) față de verticala terestră. De exemplu, dacă axa de rotație a aparatului este în poziție verticlă atunci cînd nava se află în poziție orizontală și se pune în mișcare de rotație aparatul, atunci — indiferent de poziția navei — această axă se menține în poziția inițială.

Giroscopul este instalat pe un dispozitiv asemănător cu așa-numita suspensie cardanică și, de aceea, el se comportă ca și cum ar fi suspendat în aer (fig. 137) astfel că, oricum s-ar mișca nava, axa de rotație se menține neschimbată.

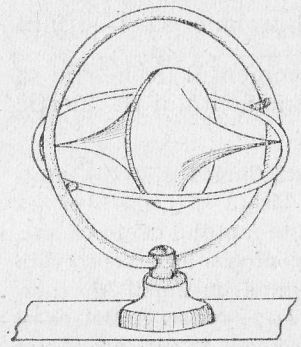


Fig. 137. Schema giroscopului.

Dar giroscopul în rotație este folosit și pentru menținerea automată a direcției de mers a unui avion sau a unei torpile. Pentru a se realiza acest lucru, se mai folosesc, pe lîngă giroscop și niște mecanisme care „urmăresc" modul cum deviază direcția axei torpilei sau avionului față de direcția axei de rotație a giroscopului.

Giroscopul stă la baza construirii și funcționării aparatului denumit *busolă giroscopică* sau *compas giroscopic*. Forțele de frecare și forța Coriolis[1] determină așezarea giroscopului în așa fel încît axa să fie paralelă cu axa Pămîntului și, ca atare, în aceste condiții, busola giroscopică va arăta nordul.

Compasul giroscopic este folosit foarte adesea în navigația maritimă. Giroscopul, care intră în alcătuirea busolei giroscopice, este pus în mișcare de rotație de către un motor avînd un volant greu. Acest motor imprimă giroscopului o

[1] După numele fizicianului francez Gaspard Coriolis (1792—1843), care a descoperit apariția forțelor de inerție (denumite astăzi, de către unii fizicieni, pseudoforțe) în cazul corpurilor care au o mișcare după direcția razei într-un sistem ce se găsește în mișcare de rotație. De exemplu, în cazul mobilelor de pe Pămînt care se deplasează de la poli la ecuator sau invers.



mișcare de rotație cu frecvența de cca 417 rotații pe secundă (turația fiind de cca 25 000 rotații pe minut). Un dezavantaj al acestei busole giroscopice îl constituie faptul că ea suferă totuși influența balansului navei; această influență este, însă, destul de mică și poate fi neglijată.

Legile de conservare date aici sînt legi fundamentale și ele sînt valabile în toate teoriile fizicii moderne.

## LEGEA CONSERVĂRII SARCINII ELECTRICE

Particulele elementare, electronii[1], protonii[2], pozitronii, antiprotonii se găsesc într-o continuă stare de mișcare și sînt înconjurate de *cîmp electromagnetic*, așa cum orice corp este înconjurat de cîmp gravitațional. Se spune că aceste particule au *sarcină electrică*. Sarcina electrică este o proprietate aditivă a substanței sau proprietatea de bază, distinctivă, a electricității (I.E. Tamm) alături de celelalte proprietăți ca: masă, energie, impuls, care sînt inerente și altor forme ale materiei. Sarcina electrică este o proprietate cuantificată, care nu poate lua decît valori discrete, multipli întregi ai unei sarcini elementare, unitate naturală pentru sarcina electrică. Electronul și antiprotonul au sarcină electrică negativă, iar protonul și pozitronul sarcină electrică pozitivă. Aceste particule au sarcina electrică egală cu unitatea de sarcină electrică. Valoarea ei absolută, măsurată în SI., este de $1{,}602 \cdot 10^{-19}$C.

(În SI. unitatea de măsură pentru sarcina electrică este coulombul; simbol C. Față de unitățile fundamentale ale SI unitatea coerentă de sarcină electrică este amper-secunda; deci, 1 C = 1 A · s.)

Termenul de sarcină electrică este folosit pentru a defini cantitativ electricitatea, prin electricitate înțelegîndu-se, cel mai adesea, întregul ansamblu al fenomenelor electromagnetice. Particulele elementare cu sarcină electrică împreună cu cîmpul lor electromagnetic reprezintă un tot unitar, deoarece este imposibil să se stabilească o limită între parti-

[1,2] Aceste particule intră în construcția atomului, dar în anumite condiții se găsesc și în stare liberă.

culele cu sarcină electrică și cîmpul lor electromagnetic. Important de reținut este faptul că, dacă particula elementară cu sarcină electrică nu poate fi concepută fără cîmpul ei electromagnetic, cîmpul electromagnetic, însă, poate să existe separat de particulă, adică în stare liberă. De exemplu, cîmpul electromagnetic radiat de o antenă.

Să facem un mic calcul. Întrucît masa electronului este de $9 \cdot 10^{-31}$kg, aceasta înseamnă că trebuie să avem $10^{30}$ electroni pentru ca masa lor totală să fie de 1 kg $\left(N = \frac{1\text{ kg}}{9 \cdot 10^{-31}\text{ kg}} = \frac{1}{9 \cdot 10^{-31}} \approx \frac{1}{10^{-30}} = 10^{30}\text{ electroni}\right)$. Ne mai amintim din școală că la un curent electric de 1 A printr-un conductor, prin secțiunea transversală a acestuia, trece o sarcină electrică de 1 C = 1 A · s, adică $6{,}24 \cdot 10^{18}$ electroni în fiecare secundă $\left(n = \frac{1\text{ A} \cdot \text{s}}{1{,}602 \cdot 10^{-19}\text{ A} \cdot \text{s}} = 6{,}24 \cdot 10^{18}\text{ electroni}\right)$. Putem calcula cît timp un kilogram de electroni ar putea menține într-un circuit un curent de un amper; vom avea: $\frac{10^{30}}{6{,}24 \cdot 10^{18}} \approx 1{,}6 \cdot 10^{11}$ s $\approx 44 \cdot 10^{6}$ ore $\approx 18 \cdot 10^{5}$ zile sau $5 \cdot 10^{3}$ ani. Ca să ne dăm seama ce înseamnă aceasta, să presupunem că un troleibuz sau tramvai funcționează cu un curent de 200 A. Acest mijloc de transport în comun ar putea funcționa fără întrerupere 25 de ani $\left(\frac{5 \cdot 10^{3}\text{ A} \cdot \text{ani}}{200\text{ A}} = 25\text{ ani}\right)$. Viteza maximă a acestor vehicule fiind de 40 km/h și cum 25 de ani înseamnă 219 600 ore, urmează că lungimea drumului parcurs ar fi de 8 784 000 km. Aceasta ar însemna cam de 24 ori drumul dus și întors dintre Pămînt și satelitul său natural Luna, sau de 218,5 ori lungimea ecuatorului pămîntesc. În acest timp prin motorul vehiculului ar trece numai 1 kg de electroni! Ce constatăm? În primul rînd că numerele referitoare la electroni sînt or extraordinar de mari, or fantastic de mici. De aceea, uneori ne este destul de greu să le concepem. În al doilea rînd, dacă ar fi posibil să se strîngă 1 kg de electroni și s-ar găsi mijlocul de a-i folosi în anumite instalații, avantajele ar fi de-a dreptul uluitoare.



Atomul este, din punct de vedere electric, neutru. Numărul de electroni este egal cu numărul de protoni, adică sarcina electrică negativă totală este egală cu sarcina electrică pozitivă totală a atomului. Dacă printr-un procedeu oarecare unui atom i se ia un electron, atunci el își pierde caracterul neutru și rămîne încărcat pozitiv cu sarcina electrică egală cu $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C; dacă un atom pierde 5 electroni, atunci el rămîne încărcat pozitiv cu sarcina electrică de $5 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}$C, adică cu sarcina electrică a protonilor necompensați. Un astfel de atom încărcat cu sarcină electrică pozitivă se numește ion pozitiv. Cînd un atom primește unul sau mai mulți electroni, el se încarcă negativ și deci devine un *ion negativ*.

Să ne gîndim acum la fenomenul electrizării prin frecare a corpurilor, fenomen cunoscut foarte bine de către cititori. Ne amintim, desigur că ambele corpuri, cel frecat și cel care freacă (de exemplu bagheta de sticlă ori ebonită și mătasea sau lîna) se electrizează, se încarcă cu sarcină electrică. Dar de ce? Prin frecare suprafața intimă de contact dintre cele două corpuri se mărește și, astfel, electroni periferici trec de pe un corp pe altul; în acest fel ambele corpuri se încarcă, unul cu sarcină electrică pozitivă, celălalt cu sarcină electrică negativă. Sarcinile electrice în exces de pe cele două corpuri sînt egale și de semne contrare, astfel încît suma sarcinilor electrice se conservă. În cazul bastonului de sticlă, electronii periferici ai atomilor trec de pe sticlă pe mătase sau postav, iar în cazul ebonitei electronii periferici ai atomilor din blană sau lînă trec pe ebonită. Așadar, nu frecarea este cauza încărcării cu sarcină electrică a corpurilor, ci trecerea electronilor de pe un corp pe altul datorită contactului direct dintre ele. Frecarea facilitează, numai, această trecere, prin creșterea suprafeței intime de contact, perturbînd puțin starea neutră a ambelor corpuri.

Dar corpurile se pot încărca cu sarcină electrică și prin alte procedee: prin contact, prin inducție (influență), prin compresiune, prin iradiere, prin incandescență, prin încălzire etc. Sarcina electrică o vom nota cu litera $q$.

Sarcina electrică totală a unui corp este egală cu suma algebrică a sarcinilor electrice ale tuturor electronilor și protonilor aparținînd tuturor atomilor din corpul respectiv. Mai sus am reamintit că la electrizarea prin frecare ambele corpuri se încarcă cu sarcini electrice egale, dar de semne contrare, astfel că suma algebrică a sarcinilor se conservă.

Într-adevăr, în secolul al XIX, Faraday a stabilit o lege empirică care afirmă că *sarcinile electrice nu pot fi create, nici distruse.* Această *lege a lui Faraday*, cunoscută astăzi, uneori, și sub denumirea de *principiul conservării sarcinii electrice*, se formulează astfel: *fiind dat un sistem izolat de corpuri, suma algebrică a sarcinilor electrice repartizate în diferite puncte ale sistemului este constantă.* Prin sistem izolat, din punct de vedere electric, trebuie să înțelegem sistemul care este suficient de depărtat de oricare alte corpuri, astfel încît să nu se manifeste asupra sa nici o influență de natură electrică, din partea acelor corpuri.

Michael *Faraday*, fizician și chimist englez, membru al Societății Regale din Londra, s-a născut la Nevington – Butta, în apropierea Londrei, în anul 1791 și a murit la Hampton Court, în anul 1867. Faraday a urmat lecțiile lui Davy (1778–1829), chimist englez, apoi a fost numit, în 1812, ajutor de preparator al acestuia. În anul 1813 a făcut, împreună cu Davy, un voiaj în țările Europei. Cu acest prilej a cunoscut mulți oameni de știință și a aflat multe lucruri noi. Reîntors la Londra, în anul 1815, Faraday reîncepe munca științifică în laboratorul lui Davy, dînd ajutor la cercetările de chimie ale acestuia. Din 1816 începe să lucreze independent.

**Michael Faraday**



Frumoasele și importantele cercetări ale lui Faraday în domeniul electricității și magnetismului datează din anul 1821. Este anul în care el constată acțiunea exercitată de un magnet asupra unui conductor mobil străbătut de curent electric și întreprinde atunci, concomitent cu Ampère, îndrăznețe lucrări care au constituit baza teoriei electromagnetismului; de aceea, el este considerat ca unul dintre fondatorii acestei teorii.

În anul 1831, luna august, descoperă fenomenul de inducție electromagnetică (după 10 ani de muncă asiduă), inducție produsă într-un circuit metalic de un magnet sau de către Pămînt și dă legea fenomenului lege care-i poartă numele. El emite atunci o teorie nouă cu privire la fenomenul de electrizare prin influență (inducție). Faraday respinge total ideea acțiunii la distanță, presupunînd că transmiterea acțiunii se face din aproape în aproape prin intermediul eterului și cu viteză finită. El introduce noțiunea de linii de forță (astăzi linii de cîmp).

Cu 4 ani înaintea descoperirii fenomenului de inducție electromagnetică, adică în anul în care Ohm descoperă legea care-i poartă numele, Faraday este numit profesor la catedra pe care o deținuse Davy.

Activitatea extraordinară a lui Faraday în această perioadă a fost consemnată minuțios în lucrarea sa *Experimental Researches in Electricity* (Cercetări experimentale asupra electricității), pe care începe să o publice începînd din anul 1832. Lucrarea cuprinde peste 3 000 de paragrafe și, după părerea specialiștilor, nu are analog în literatura științifică mondială. În această lucrare sînt consemnate detaliat marile sale descoperiri. Experiențele descrise aici au revoluționat gîndirea fizicienilor.

În anul 1833 stabilește legile electrolizei, introducînd noțiunea de echivalent electrochimic și introduce denumirile de catod, anod, electrod, ion ș.a., iar începînd din anul 1836 dezvoltă teoria liniilor de forță, electrice și magnetice. În anul 1845 introduce ideea de cîmp electric și cîmp magnetic, care avea să-l conducă mai tîrziu pe Maxwell la fondarea teoriei electromagnetice a luminii. Descoperă apoi proprietățile magnetice ale substanțelor (paramagnetismul și diamagnetismul), precum și acțiunea cîmpului magnetic asupra luminii, acțiune manifestată prin *rotirea planului de polarizare a luminii (polarizarea rotatorie magnetică*, fenomen cunoscut sub denumirea de *efect Faraday)*. Cu acest prilej, pentru a sublinia importanța descoperirii sale, el spune: „Am reușit să magnetizez și să electrizez o rază de lumină și să fac luminoasă o linie de forță magnetică".

Faraday întrevede posibilitatea existenței undelor electromagnetice sau a „radiațiilor electromagnetice", concepute ca o „formă superioară de oscilații ale liniilor de forță".

Conștient de importanța acestei idei, Faraday caută să-și asigure prioritatea, în cazul cînd undele electromagnetice vor fi descoperite experimental. El predă în anul 1832, spre păstrare, comunicarea sa, într-un plic sigilat, arhivei Societății Regale din Londra, cu indicația de a fi desfăcut peste 100 de ani. Plicul a fost deschis în anul 1932, an în care undele electromagnetice se utilizau curent în electrotehnică.

Faraday cercetează posibilitatea obținerii de gaze lichide, reușind să lichefieze, în anul 1823, clorul, acidul carbonic, protoxidul de azot ș.a.

Scrierile lui Faraday, destul de numeroase, au fost reunite în trei volume și au apărut în anii 1839, 1844 și 1855.

Biografia lui Faraday a fost publicată în limba engleză de către J. Tyndall (1820—1893).

Legea conservării sarcinii electrice[1] a fost supusă la numeroase și minuțioase verificări experimentale, fără să se poată constata vreo excepție. Verificările s-au făcut atît la scara macroscopică de observație, cît și la scară microscopică.

Și acum două exemple, din domenii diferite, în care se vede clar că sarcina electrică se conservă. În fizica nucleară s-a stabilit experimental că atunci cînd un electron (a cărui sarcină electrică este $-e$) și un pozitron (acesta are sarcina electrică $+e$) sînt aduși suficient de aproape, unul de altul, pot să se anihileze, rezultînd doi fotoni (gamma) avînd aceeași direcție de mișcare, însă sensuri opuse. Sarcina electrică totală a particulelor inițiale este nulă și egală cu sarcina electrică totală a fotonilor rezultați (fotonii, așa cum bine știm, au sarcina electrică egală cu zero). Prin urmare, *sarcina electrică*, în acest proces, *se conservă*.

Vom considera acum un proces caracteristic de dezintegrare radioactivă, în care un nucleu radioactiv de uraniu, $^{238}U$, care cuprinde 92 de protoni (deci sarcina electrică egală cu $+92e$), se dezintegrează spontan transformîndu-se într-un nucleu de toriu, $^{234}Th$, ce conține 90 de protoni (sarcina electrică $+90e$), emițînd o particulă $\alpha$, adică un nucleu de heliu, $^{4}He$ (sarcina $+2e$). Acest tip de dezintegrare se scrie

$$^{238}U \rightarrow {}^{234}Th + {}^{4}He.$$

Se observă ușor că sarcina electrică totală după acest proces este egală cu sarcina electrică inițială [(+90e) + (+2e) = + 92e], deci sarcina electrică se conservă.

Se știe că tritiul este un izotop al hidrogenului și că este radioactiv. Un nucleu de tritiu prin dezintegrare (are sarcina $+e$), trece într-un nucleu al unui izotop al heliului, $^{3}He$, cu expulzarea unui electron. Și aici, ca în toate cazurile, legea conservării sarcinii electrice se verifică.

Experimental aceasta se poate demonstra în felul următor. Pe un baston de ebonită, de exemplu, se înfășoară staniol formînd un tub care să lunece pe baston. Ținem sistemul astfel format ușor înclinat deasupra sferei unui electroscop neîncărcat (fig. 138, a) (desigur cititorul își mai amintește ce este un electroscop), în așa fel încît cilindrul de staniol lunecînd să atingă, în cădere, sfera. Se va observa imediat că foițele diverg formînd un unghi $\alpha$ (fig. 138, b). Descărcăm electroscopul și aducem bastonul de ebonită în contact cu sfera. Se va observa că foițele diverg cu același unghi (fig. 138, c). La fel de simplu se poate demonstra

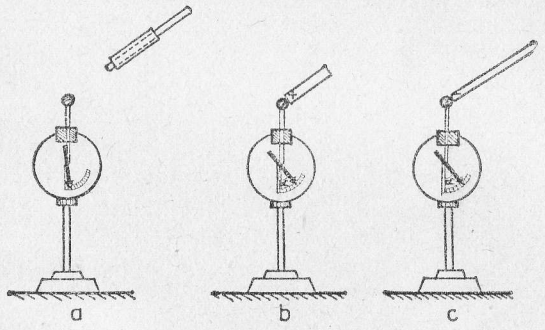



Fig. 138. Pentru explicarea legii conservării sarcinii electrice.

că cele două corpuri sînt încărcate cu sarcini electrice de semne contrare. În acest scop vom repeta experiența puțin modificată și anume, vom lăsa cilindrul de staniol să alunece

[1] Legea rămîne valabilă oricare ar fi transformările ce se produc în sistem.

pe bastonul de ebonită; venind în contact cu sfera electroscopului, foițele acestuia se vor depărta formînd între ele un unghi $\alpha$.

Aducem bastonul de ebonită în contact cu sfera și vom vedea că electroscopul se descarcă. Așadar, cele două feluri de sarcină electrică apar simultan și în cantități egale.

Legea conservării sarcinii electrice este analogă și are aceeași importanță ca și legea conservării materiei, descoperită de către Lavoisier[1] și Lomonosov[2], independent unul de altul și în același timp.

[1] Antoine Laurent de *Lavoisier* (1743—1794), chimist francez. Este unul dintre creatorii chimiei moderne. A scris *Tratat elementar de chimie*. A fost ghilotinat în timpul revoluției franceze.

[2] Mihail Vasilievici *Lomonosov* (1711—1765), savant enciclopedist și scriitor rus. Este considerat ca unul dintre precursorii teoriei atomiste moderne.

# ÎNTREBĂRI ȘI RĂSPUNSURI

*„Să cauți adevărul este mai de preț decît să-l posezi."*

G.E. Lessing

## ÎNTREBĂRI

**1.** Să ne imaginăm un tunel prin interiorul Pămîntului de la polul nord la polul sud (desigur, imposibil de realizat practic). La fiecare extremitate a tunelului stau experimentatori. La un moment dat, experimentatorul de la polul nord, de pildă, lasă să cadă liber, un obiect. Cum se va mișca acest obiect prin tunel și unde s-ar opri?

**2.** Să ne închipuim un tunel între două localități de pe glob, să zicem din emisfera nordică, localități aflate la mare distanță una de alta. Prin acest tunel un tren s-ar putea deplasa fără a fi nevoie de locomotivă. Puteți explica de ce?

**3.** Cine s-a apropiat cel mai mult de centrul Pămîntului?

**4.** Fie o platformă rotitoare avînd la margine un perete circular înclinat. Se pune întrebarea: în ce condiții un om ar putea să stea în picioare pe acest perete?

**5.** Să presupunem că într-un satelit artificial al Pămîntului, un astronaut dorește să-și aprindă o țigară. Aprinde chibritul, îl duce la extremitatea liberă a țigării și aici se stinge. Repetă, și rezultatul este același. De ce?

**6.** Să se explice ce se întîmplă atunci cînd ajunge sarea la ochi?

**7.** Dar dacă apa curată vine în contact cu ochii?

**8.** Dar cînd apa de mare vine în contact cu ochii?

**9.** În vitrina unor ceasornicării și magazine cu produse de artizanat există o pasăre bizară: cu toate că e de sticlă ea „bea" mereu apă. Este așa-numita pasăre japoneză. Să



se arate cum funcționează și dacă funcționarea ei vine în contradicție cu vreunul din principiile termodinamicii.

**10.** De ce merge fulgerul în zigzag prin aer?

**11.** Ce știm despre „focul sfîntului Elmo"?

**12.** Cum se restaurează documentele vechi?

**13.** a) Cum a fost imaginat un perpetuum mobile electric? b) Dar un perpetuum mobile magnetic?

**14.** Ce știți despre sicriul lui Mahomed?

**15.** Ați auzit de „doctorul electromagnet"?

**16.** Dar despre „lada fermecată"?

**17.** De ce tabla zincată nu ruginește?

**18.** Se poate folosi cîmpul magnetic la alesul semințelor?

**19.** Cum se explică culoarea corpurilor (grosso modo)?

**20.** De ce zăpada este albă?

**21.** De ce sticla pisată nu mai este transparentă, ci opacă și albă?

**22.** Cînd o lupă micșorează?

**23.** Cum vedem sub apă?

**24.** Care este adevărata adîncime a unei ape?

**25.** Cum se formează curcubeul?

**26.** Cum se explică jocul de colorații pe baloanele de săpun, pe nasturii de sidef ș.a.?

## RĂSPUNSURI

**1.** În figura 139 este reprezentat tunelul ipotetic. Pentru a explica mișcarea obiectului vom presupune neglijabilă rezistența aerului și frecarea. Lăsînd liber obiectul la Polul Nord, el se va mișca accelerat, iar viteza lui ar crește trecînd

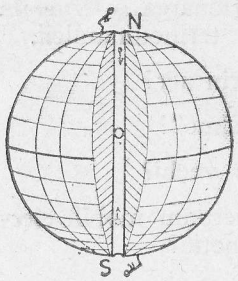



Fig. 139. Pentru explicarea mișcării unui obiect printr-un tunel imaginar care ar trece prin centrul Pămîntului.

printr-un maxim cînd obiectul ar trece prin centrul Pămîntului. Această viteză ar fi atît de mare încît obiectul ar trece uluitor de repede prin centru, mișcîndu-se mai departe. Viteza lui, însă, va scădea treptat devenind aproape nulă la Polul Sud, după care el s-ar mișca din nou înspre centrul Pămîntului, accelerat, ar trece cu viteză maximă prin centru și mai departe la Polul Nord și mișcarea ar reîncepe. Așadar, obiectul nu se va opri nicăieri în interiorul Pămîntului, ci doar la poli. Să presupunem acum că intrarea în tunel la Polul Nord se află la 5 km înălțime față de nivelul mării. În aceste condiții, obiectul va atinge viteza zero la înălțimea de 5 km față de ieșirea din tunel.

**2.** Să privim figura 140. Să presupunem că trenul pleacă din localitatea *A*, dîndu-i-se un impuls. Datorită faptului că distanța față de centrul Pămîntului scade treptat, trecînd printr-un minim atunci cînd trenul trece prin *B*, viteza trenului crește atingînd valoarea maximă prin *B* și va

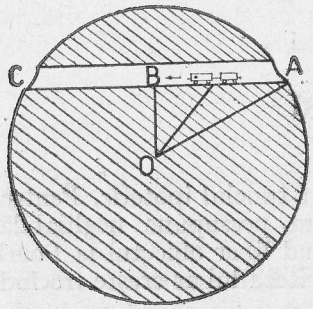



Fig. 140. Pentru explicarea mersului unui tren printr-un tunel imaginar care ar trece prin interiorul Pămîntului.



continua să se miște mai departe cu viteză tot mai mică, pînă ce ajunge în *C*, unde viteza va fi zero. Fenomenul este similar cu acela descris în răspunsul 1. Desigur că durata unei astfel de călătorii ar fi incomparabil mai scurtă decît durata călătoriei pe suprafața Pămîntului. Ca și în răspunsul 1, și aici se consideră neglijabilă rezistența aerului și frecarea.

**3.** Știm că Pămîntul are forma de geoid, adică o sferă turtită la poli. De asemenea, cunoaștem că s-au făcut foraje la mare adîncime. Această mare adîncime este însă mai mică decît diferența dintre raza Pămîntului la Ecuator și raza Pămîntului la poli. Rezultă deci că acela care a ajuns la unul dintre poli, s-a aflat la cea mai mică distanță față de centrul Pămîntului.

**4.** Să privim figura 141. Observăm că asupra unei persoane aflată la marginea platformei turnante, acționează două forțe: greutatea și forța centrifugă. Să neglijăm frecarea. Aceste două forțe dau o rezultantă $\vec{R}$. Dacă viteza unghiulară a platformei nu este prea mare, persoana respectivă

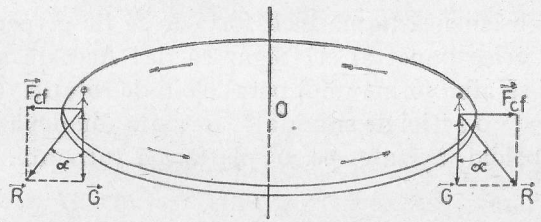



Fig. 141. Forțele care acționează asupra unui om aflat pe o platformă în mișcare de rotație.

are impresia că stă pe un plan înclinat, tocmai datorită forței $\vec{R}$. Cu cît crește viteza unghiulară, cu atît ea are impresia că panta planului imaginar este mai mare; simultan apare și un sentiment de nesiguranță. Modificăm experiența în sensul că folosim o platformă prevăzută pe margine cu

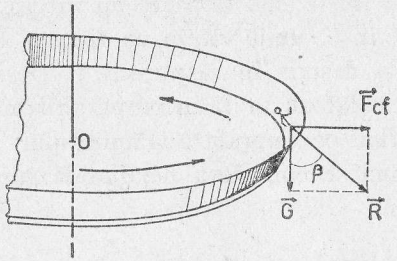



Fig. 142. Forțele care acționează asupra unui om aflat pe peretele înclinat al unei platforme care efectuează o mișcare de rotație.

un perete înclinat, ca în figura 142. În acest caz, la o anumită viteză unghiulară, o persoană care, în condițiile cînd platforma era în repaus, nu se putea menține decît foarte greu pe perete, acum are impresia că stă pe un plan orizontal. Evident, tot datorită forței $\vec{R}$ și deci nu are acel sentiment de nesiguranță. Forța $\vec{R}$ trebuie să fie perpendiculară pe suprafața peretelui. Aceasta ne conduce la întrebarea firească: oare nu s-ar putea construi o suprafață de o asemenea formă încît forța $\vec{R}$ să fie perpendiculară pe ea în orice punct al ei? Sigur că da! Această suprafață ar trebui să aibă forma unui paraboloid de rotație. În figura 143 se arată o astfel de suprafață, formată din două jumătăți de paraboloid așezate pe o platformă turnantă. Desigur,

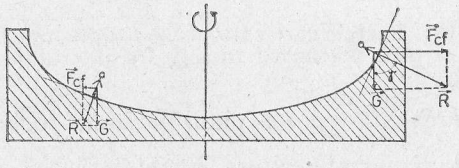



Fig. 143. Forma pe care ar trebui să o aibă o platformă pentru ca omul să aibă senzația că stă vertical întocmai ca pe Pămînt, cînd platforma se află în mișcare de rotație.



platforma trebuie să aibă o anumită viteză care se poate calcula. Lăsăm în seama cititorului acest calcul simplu.

**5.** În interiorul satelitului este creată o stare de imponderabilitate. Așa fiind, aerul nu mai circulă, din care cauză locul în jurul chibritului aprins nu se primenește cu oxigen. Bioxidul de carbon degajat și rămas pe loc izolează flacăra și, de aceea, aceasta se stinge.

**6.** Explicația este asemănătoare cu aceea dată la p. 232 cu privire la carnea sau peștele așezat în sare. Vom spune deci că sarea venind în contact cu ochiul, care este permanent umed (sub pleoape), formează o soluție hipertonică față de soluția din ochi, care este hipotonică. Așa fiind presiunea osmotică în ochi este mai mică decît presiunea osmotică a soluției hipertonice. Ca urmare solventul din ochi, adică apa, va trece în exterior. Această trecere provoacă usturimi, deoarece moleculele de apă trebuie să străbată membrana semipermeabilă ce căptușește ochiul, membrană cuprinzînd terminații nervoase. Evident, senzația este transmisă creierului.

**7.** Apa curată constituie o soluție hipotonică în comparație cu soluția din ochi și, ca urmare, va pătrunde în ochi. Mai departe explicația este ca la punctul 6.

**8.** Presiunea osmotică a apei de mare este aproximativ egală cu presiunea osmotică a soluției din ochi, adică cele două soluții în contact sînt izotonice. Așa fiind, nu se produce trecerea solventului de la o soluție la alta.

**9.** Pasărea japoneză constă din două sfere de sticlă unite printr-un tub de sticlă (fig. 144). În interior se introduce, în sfera mai mare, eter și apoi se scoate aerul. Sfera mai mică, prevăzută cu un cioc mare, reprezintă capul păsării și este acoperită cu un strat de substanță higroscopică și menținută umedă tot timpul. Eterul aflat în sfera mare se evaporă, vaporii ajungînd în interiorul sferei mai mici,

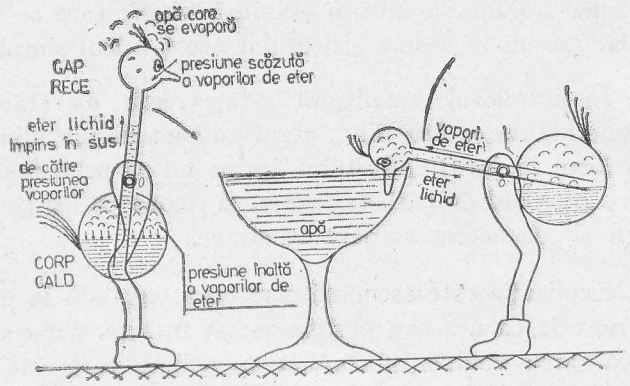



Fig. 144. Pasărea japoneză.

care, așa cum am spus, reprezintă capul păsării. Aici, vaporii de eter se condensează și eterul lichid rezultat se depune în tubul ce leagă cele două sfere, tub în care, de altfel a și pătruns o parte din eterul aflat în sfera mare, din cauza presiunii pe care o exercită vaporii de eter asupra eterului din această sferă. La un moment dat partea de sus a păsării devine mai grea decît partea de jos și pasărea se înclină luînd poziția orizontală și pătrunzînd cu ciocul în paharul aflat în vecinătatea ei. La introducerea ciocului în pahar substanța higroscopică primește apă, se umezește. În acest timp eterul din tub se scurge în sfera mare mărindu-i astfel greutatea și, ca urmare, pasărea revine la poziția inițială și fenomenul se repetă. Dacă în paharul despre care am vorbit ar fi alcool pur, sfera mică s-ar răci mai repede și deci fenomenul descris se va desfășura într-un interval de timp mult mai scurt. Să introducem acum pasărea cu pahar cu tot sub un clopot de sticlă. Vom observa că la un moment dat pasărea își încetează mișcarea. De ce? Pentru că spațiul fiind limitat se saturează cu vapori de apă. Aceasta explică de ce pasărea funcționează un timp mai îndelungat atunci cînd atmosfera este mai uscată, adică umiditatea ei relativă este scăzută și, invers, dacă umiditatea este mai mare durata funcționării ei este mică.



Pasărea japoneză poate fi considerată ca o mașină termică în care cele două sfere reprezintă cele două surse de căldură. Sfera mare este sursa caldă, iar sfera mică sursa rece. Căldura trece de la sursa caldă la cea rece transformîndu-se parțial în lucru mecanic și astfel pasărea se mișcă (mișcare în plan vertical în jurul axului orizontal ce trece prin *O*). Așadar, funcționarea păsării japoneze nu contrazice nici unul din principiile termodinamicii.

**10.** Cunoaștem că fulgerul este o descărcare electrică ce are loc între purtătorii de sarcină de un semn și purtătorii de sarcină de semn contrar, purtători care se află în părți diametral opuse ale norului. Este o descărcare similară cu aceea produsă între eclatorul și colectorul unei mașini electrostatice Van de Graaff; primul este încărcat pozitiv (după ce în prealabil am rotit de mai multe ori manivela de la baza colectorului), iar colectorul negativ. Scînteia este în formă de zigzag. În cazul fulgerului, descărcarea se prezintă asemănător unui fluviu cu mulți afluenți văzut de la înălțime. În desen se reprezintă tot în zigzag. Dar de ce? Să ne gîndim la faptul că descărcarea se produce cînd tensiunea dintre zonele diametral opuse este de ordinul sutelor de mii pînă la milioane și sute de milioane de volți, iar curentul echivalent descărcării poate atinge valori pînă la 20 000 A. De aceea, descărcarea încălzește puternic mediul prin care trece, iar gazele încălzite se ridică, presiunea micșorîndu-se, astfel că fulgerul întîlnește mereu în calea sa zone cu aer încălzit, deci la presiune mai mică și zone cu aer rece, deci la presiune mai mare. Cum aerul sub presiune mică constituie un drum mult mai accesibil pentru descărcare decît aerul sub presiune mai mare, urmează că descărcarea electrică, fulgerul, va ocoli zonele cu aer la presiune mare, trecînd prin zone cu aer la presiune mică. Așa se explică multiplele ramificații pe care le prezintă fulgerul.

Dar în locul în care aerul s-a dilatat năvălește aer rece și datorită acestui fenomen se aude tunetul, dar mai tîrziu,

deoarece lumina se propagă prin aer (mai exact în vid) cu viteza de 300 000 km/s, în timp ce sunetul numai cu 330—340 m/s (în vid sunetul nu se propagă).

Descărcările între doi nori încărcați electric sau între nori și Pămînt sînt foarte rare. În astfel de cazuri se produc trăsnete, care, așa cum știm, sînt extrem de periculoase. Așa cum cunoaștem, împotriva descărcărilor electrice atmosferice se folosesc paratrăsnetele, pentru apărarea clădirilor sau a stîlpilor înalți.

**11.** Cînd atmosfera este încărcată, pregătită pentru declanșarea unei furtuni, se observă cum pe vîrfuri înalte apar fascicule luminoase, iar în jurul capului persoanelor aflate pe locuri mai ridicate apare un nimb luminos. La țară, fenomenul se vede mai adesea la colțurile acoperișurilor de tablă. Cu secole în urmă fenomenul se observa și în vîrful lăncilor soldaților. Se mai observa și se observă pe vîrful urechilor cailor și chiar pe coama lor. Desigur că, necunoscînd explicația fenomenului, oamenii îl atribuiau zeităților, unei puteri supranaturale. Dacă mai adăugăm și faptul că acest „foc" este rece, ne dăm seama de frica pricinuită. De aceea, oamenii au numit acest „foc" — „focul sfîntului Elmo" și în jurul lui s-au brodat, în decursul timpului, tot felul de povești și de superstiții.

Cu cîteva zeci de ani în urmă, un căpitan de vapor care observase împreună cu alți marinari „focul sfîntului Elmo" pe vîrful steagului aflat la rîndu-i în vîrful catargului, a dat ordin unui marinar să se urce pe catarg și să aducă steagul cu „focul" pe el, pe puntea vasului. Marinarul s-a urcat, a scos steagul și, spre marea uimire a marinarului și a celor de pe punte, fasciculul luminos a sărit pe vîrful catargului. Și mai mare a fost uimirea cînd marinarul le-a spus că acest „foc" este rece și că se aud continuu un fel de trosnituri asemănătoare cu acelea care se produc atunci cînd ard lemne umede.

Desigur că fenomenul descris n-are nici o legătură cu sfîntul Elmo sau cu alți sfinți. Dar cu fizica în mod sigur are legătură.



Cum apare acest fascicul luminos? Dacă la colectorul unei mașini Van de Graaff atașăm o vergea ascuțită, observăm, în timpul cît învîrtim manivela pentru încărcarea colectorului cu sarcini electrice, că din vîrful respectiv ies niște jerbe luminoase formînd un fascicul. Pentru observare clară este necesar ca în cameră să fie întuneric. Colectorul fiind încărcat electric, totodată se încarcă și vîrful, care generează la rîndul său un cîmp electric, sub acțiunea căruia au loc fenomene de ionizare și excitare a moleculelor din aer, urmate de fenomene de recombinare și dezexcitare. Ca urmare a fenomenului de dezexcitare apare și fenomenul menționat.

Așa stau lucrurile și cu „focul sfîntului Elmo". Atmosfera fiind încărcată, se încarcă puternic și vîrfurile, producîndu-se — cu intensitate incomparabil mai mare — ionizări, excitări, recombinări și dezexcitări ale moleculelor din aer. Grație dezexcitărilor se vede fasciculul luminos. Așadar, fenomenul acesta, care a stîrnit atîta frică printre oameni, nu-i altceva decît o descărcare electrică. Uneori se observă și iarna, cînd au loc furtuni puternice.

**12.** Cunoaștem că două corpuri încărcate electric cu sarcini purtînd același semn se resping. Acest fenomen stă la baza uneia dintre metodele de restaurare a cărților și a papirusurilor vechi descoperite cu prilejul săpăturilor arheologice, documente care prezintă o mare valoare istorică și muzeistică. Cărțile au foile lipite și gata să se transforme în bucăți la încercarea de a le despărți. La fel și papirusurile. Soluția problemei este următoarea. Printr-un anume procedeu, în laboratoare specializate, se încarcă electric cartea. Forța de respingere dintre foi acționează asupra fiecărei puncte cu aceeași intensitate și în exact același interval de timp și astfel acestea se desprind. La fel se procedează cu papirusurile. Simplu, nu?

**13.** a) Un dinam și un electromotor erau prevăzute cu cîte o roată de transmisie (prin curea), peste care trecea o

curea de transmisie. Apoi cele două mașini electrice erau legate prin conductoare electrice, dinamul furnizînd energie electrică electromotorului, iar acesta, funcționînd, furniza energia mecanică necesară dinamului prin intermediul transmisiei prin curea. Așadar, cele două mașini punîndu-se în mișcare una pe alta, mișcarea lor ar continua la nesfîrșit. Corect și simplu, nu? În aparență, doar! Cînd inventatorii au încercat să le pună în mișcare au constatat, surprinși, că nu reușesc. Este ușor să punem în funcțiune, separat dinamul, separat electromotorul, dar ansamblul descris nu. De ce? Să presupunem că am pus în mișcare dinamul; acesta funcționează atît timp cît primește energie mecanică, furnizînd, la rîndu-i, energie electrică. Întrerupînd, însă, sursa de energie mecanică, din cauza frecărilor mașinăria se oprește. Tot așa și ansamblul dinam-electromotor. Dacă aceste mașini ar fi lipsite, prin absurd, de frecare, tot nu ar fi de folos funcționarea lor, deoarece în momentul cînd am dori să folosim acest ansamblu ca furnizor de energie, nu am putea, tot din pricina frecărilor care se produc la consumator.

b) Vom descrie acum un perpetuum mobile magnetic realizat de un inventator din Anglia în secolul al XII-lea. Schema este arătată în figura 145. Un magnet sferic $A$ este montat pe un stîlp și de stîlp e sprijinit un jgheab dublu ca în figură. Prin săgeți se arată modul de funcționare. Urcarea sferei mici de fier $a$ pe jgheabul $J_1$ se face, evident, datorită atracției exercitate de către magnet. Este acesta un perpetuum mobile? Desigur că nu. De ce? Pentru că,

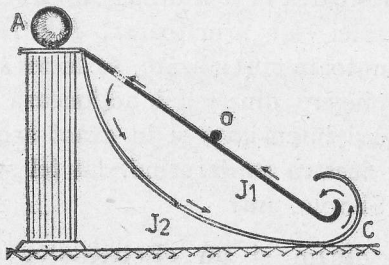



Fig. 145. Perpetuum mobile magnetic.



datorită celor două forțe — a magnetului și a gravitației, sfera mică nu se mișcă accelerat pe jgheabul $J_2$, ci dimpotrivă are o mișcare încetinită (decelerată) și astfel nu reușește să urce pe curbura $c$, pentru a ajunge pe jgheabul $J_1$, la locul inițial de plecare pe jgheab. Să nu uităm nici frecările. Așadar, alt perpetuum mobile care a fost sortit eșecului! Nu credeți? Incercați practic.

**14.** Să ne imaginăm două experiențe simple:

a) Un corp de fier prins de un lanț, în apropierea căruia, deasupra, se aduce un magnet puternic. Se va observa că corpul este atras, menținînd lanțul întins și părînd că plutește în aer.

b) Așezăm două bare magnetice pe direcție verticală, una în continuarea celeilalte cu polii de același nume „privindu-se" reciproc; prima bară, mai apropiată de Pămînt, fixă. Ele se vor respinge cu o anumită forță. Dacă această forță ar fi egală cu greutatea barei, atunci bara ar rămîne în suspensie, forțele făcîndu-și echilibru.

Și acum, ce-i cu „sicriul lui Mahomed"? Se spune, după o legendă, că sicriul cu corpul marelui profet Mahomed plutește în aer între cer și Pămînt. Explicația nu poate fi dată decît pe baza uneia din cele două experiențe descrise.

Pentru a nu „profana" locul în care se află sicriul, nu se poate face verificarea pentru stabilirea cauzei plutirii: aceea de la punctul a sau aceea de la punctul b.

**15.** Se întîmpă uneori ca unor lucrători din ateliere mecanice să le ajungă „în ochi", sub pleoape, o mică bucățică de fier. Pentru a o extrage fără pericol trebuie să se adreseze personalului medical. Dacă are, însă, la îndemînă un electromagnet, sau chiar un magnet puternic, prevăzut cu un vîrf, mica bucățică de fier poate fi extrasă fără pericol, spre deosebire de cazul cînd ar încerca să o scoată prin alte metode grosiere.

**16.** La un spectacol de varietăți, cu mulți ani în urmă, s-a prezentat următorul număr, care a făcut senzație: lada

„fermecat.". Artistul a sosit pe scenă aducînd o ladă (din tablă de fier) prevăzută cu mîner, gen valiză. Nu prea mare. A invitat să se prezinte pe scenă cel mai voinic spectator. Se urcă pe scenă un om foarte bine legat, înalt și spătos, foarte voinic, un fel de Hercule. I se spune să ridice lada. Acesta, uitîndu-se ironic la artist, ridică cu cea mai mare ușurință lada și i se adresă: pentru aceasta am fost invitat? Nu! Îți voi demonstra că pot să-ți iau puterea pentru un timp. Spectatorul îl privi pe artist neîncrezător. Apoi, artistul, după ce spuse cîteva cuvinte „magice" (pentru a-l impresiona), îi spune: acum ești mai slab decît orice copil. Pentru a te convinge, încearcă să ridici lada. Spre marea uluire a spectatorilor, Hercule de pe scenă nu a putut ridica lada cu toate eforturile depuse. Din nou artistul spuse acele cuvinte „magice" și adresîndu-i-se lui „Hercule" îi spuse că i-a redat puterea. Într-adevăr, lada a putut fi ridicată din nou cu aceeași ușurință ca la început. Explicația e atît de simplă încît o lăsăm pe seama cititorilor.

**17.** Experiența arată că dacă formăm un element voltaic cu electrozi de fier și zinc, zincul este întotdeauna pol pozitiv iar fierul negativ. Să considerăm o tablă de fier zincată. Aceasta împreună cu aerul umed din atmosferă formează un element voltaic, producîndu-se un slab cîmp electric între fier și zinc, ca urmare a reacțiilor chimice cunoscute; fierul și zincul încărcîndu-se electric, apa din aerul umed se descompune în hidrogen și oxigen. Ionii de hidrogen merg către polul negativ al elementului astfel format, adică spre fier, neutralizîndu-se, iar ionii de oxigen către zinc, neutralizîndu-se și ei. Oxigenul nevenind, astfel, în contact cu fierul acesta nu ruginește.

**18.** Separarea semințelor nefolositoare de cele bune, de exemplu separarea semințelor de trifoi, de in, sau de lucernă, care sînt netede și lucioase, de semințele de buruieni, care sînt acoperite cu peri fini se face cu ajutorul cîmpului magnetic. Procedeul este următorul: cantitatea de semințe se amestecă cu pilitura, foarte fină, de fier. Aceasta se prinde



ușor în perii semințelor de buruieni. Trecînd semințele printr-un cîmp magnetic generat de un electromagnet, semințele bune vor trece nestingherite în timp ce semințele cu pilitură de fier vor fi atrase. O astfel de instalație se folosește și se numește *separator magnetic*.

**19.** Denumirile pentru culori sînt convenționale. Un corp care reflectă total lumina albă a zilei impresionează ochiul într-un anumit mod; corpul este denumit *alb*. De exemplu, creta, varul, hîrtia velină ș.a. Corpul care absoarbe întreaga lumină albă ce ajunge la el, impresionează ochiul în alt mod și culoarea lui (a corpului) este denumită *negru*. Un corp care este roșu sau verde, reflectă numai radiația roșie și respectiv verde din spectrul vizibil. Aceasta este o explicație simplificată. Nu vom intra în amănunte. Corpurile transparente sînt colorate și prin transmisie. De pildă, sticla roșie transmite numai radiația roșie din spectrul vizibil, celelalte radiații fiind absorbite. Dar există corpuri colorate și prin reflexie și prin transmisie. De exemplu, aurul are culoarea galbenă prin reflexie și verzuie prin transmisie (aurul tras în foițe foarte subțiri, de ordinul micrometrilor, este aproape transparent).

**20.** a) Se cunoaște că suprafețele care prezintă neuniformități reflectă lumina incidentă în toate direcțiile, în general, neuniform (fig. 146). Fenomenul se numește reflexie difuză (neregulată), iar despre astfel de suprafețe se spune că *difuzează* lumina incidentă. Totuși, fenomenul decurge astfel încît fiecare rază a fasciculului incident se reflectă cu respectarea legii reflexiei. Așa cum reiese din

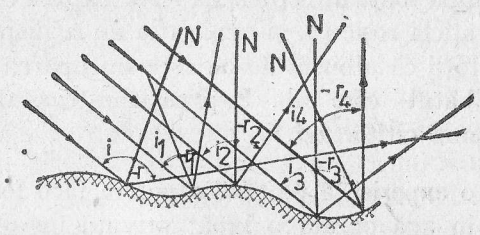



Fig. 146. Reflexia difuză.

figura 146 razele fasciculului reflectat au cele mai diferite direcții, cu toate că fasciculul incident este telecentric (paralel). Dacă o suprafață difuzează lumina incidentă absolut uniform în toate direcțiile, atunci suprafața respctivă se numește suprafață *absolut mată*. Este, evident, un caz ideal. Dar apropiat de acest caz ideal este suprafața unei foi de hîrtie de bloc pentru desen, porțelanul neemailat, zăpada ș.a.

b) Dacă am privi fulgii de zăpadă printr-o lupă am observa că ei sînt alcătuiți din cristale de gheață mici și transparente; așezarea acestor cristale este sub forma unor hexagoane regulate. Așadar, ansamblul cristalelor este alb, opac, cu toate că cristalele sînt transparente; deci zăpada este albă datorită ansamblului cristalelor. Dar de ce? Explicația este cît se poate de simplă. Totalitatea cristalelor transparente ce formează fulgii difuzează lumina albă a zilei după toate direcțiile, deoarece ansamblul lor formează o suprafață neuniformă, adică prezintă neuniformități. Și fiindcă lumina difuzată de zăpadă este albă, fără a fi absorbită vreo componentă din spectrul luminii albe, zăpada — așa cum știm — este albă (v. și explicația de la răspunsul 19). Sînt și alte fenomene care se explică în mod perfect similar.

**21.** O bucată de geam este transparentă, în timp ce sticla pisată este opacă și albă. Explicația este următoarea: geamul este transparent, deoarece lasă lumina să treacă prin el. Dacă pisăm o bucățică de geam, atunci suprafața cioburilor este neuniformă și, de aceea, difuzează lumina albă a zilei după toate direcțiile. La fel se explică dacă pisăm o bucată de sticlă roșie (v. și explicația de la răspunsul 19).

Știm cu toții că albușul de ou este transparent, în timp ce albușul „bătut" este alb. Explicația este analoagă și o lăsăm pe seama cititorului.

**22.** Iată o experiență pe care o putem face foarte ușor: introducem în apă curată o lupă; privind un obiect vom constata cu surprindere că lupa nu mărește. Aceeași constatare se face dacă în locul lupei introducem o lentilă divergentă, care — așa cum știm — dă în aer imagini micșorate. Repetăm acum experiența, dar în locul apei curate folosim apă sărată. Vom avea altă surpriză; lupa dă imagini micșorate, iar lentila divergentă dă imagini mărite. Explicația este următoarea: în aer lupa mărește datorită faptului că indicele de refracție al sticlei lentilei este mai mare decît al aerului și deci raza de lumină se refractă mult cînd trece din aer în sticlă. În apă, însă, unghiul de refracție este mult mai mic și deci raza de lumină se refractă foarte puțin. În apa sărată lupa micșorează, deoarece apa sărată are indice de refracție mai mare decît al sticlei și, de aceea, lupa dă imagini micșorate. Deci în apă sărată lupa funcționează invers decît în aer. Lentila biconcavă funcționează și ea invers decît în aer, deci va da imagini mărite. Aceasta are o aplicație foarte importantă și anume: *ochelarii de scafandru* care sînt formați dintr-o lentilă plan-concavă, goală în interior. Această lentilă funcționează ca obiectiv condensor.

**23.** Cei care au făcut antrenament mai mult sau mai puțin îndelungat, reușesc să stea cu ochii deschiși sub apă, putînd astfel să vadă în jurul lor.

Știm că fiecare corp transparent este caracterizat prin indicele său de refracție (indice de refracție absolut). Cînd lumina trece dintr-un mediu într-altul, mediile fiind adiacente și cu indici de refracție absoluți diferiți, își schimbă direcția de propagare, se refractă. Dacă mediile ar avea același indice de refracție, atunci lumina ar trece nedeviată. Se știe că indicele de refracție al apei este $\frac{4}{3}$ adică $n \cong 1{,}34$, iar părțile transparente ale ochiului omenesc au indice de refracție după cum urmează: corneea are $n = 1{,}34$, cristalinul are $n = 1{,}43$, iar umoarea apoasă $n = 1{,}34$. Diferența dintre indicele de refracție al cristalinului și al apei este de 0,09 și se spune că cristalinul are capacitatea de refracție cu 0,09 mai mare decît al apei și a celorlalte părți ale ochiului. Dar celelalte părți ale ochiului au același indice de refrac-

ție cu al apei. Așa fiind, se poate afirma că razele de lumină ce trec din apă în ochi, venind de la un obiect, nu suferă fenomenul de refracție, spre deosebire de cazul cînd ochiul și obiectele sînt în aer ($n_{aer} \approx 1$). Privind în apă, așa cum am arătat, imaginile se formează în spatele retinei și din acest motiv nu sînt clare, ci cețoase, nu se pot distinge amănunte. Interesant este faptul că miopii văd mai bine sub apă decît în aer, deoarece în ochiul miop retina este mai depărtată de cristalin în comparație cu ochiul normal (emetrop). Faptul că miopii văd mai bine sub apă se poate verifica ușor astfel: să privim printr-o lupă cu grosisment mare sau prin ochelarii unui miop; obiectele nu ne vor apare clare, ci ca niște pete voalate, ca și cum am privi prin apă. Sticla obișnuită are $n = 1{,}5$, în timp ce sticla grea de cuarț are $n \approx 3$. Înseamnă că privind prin apă cu ochelari cu lentilele din cuarț toate obiectele din jurul nostru s-ar vedea foarte clar.

**24.** a) Privind figura 147 înțelegem imediat de ce un obiect aflat pe fundul unei ape este văzut la o adîncime mai mică decît cea reală. Deplasarea $PP'$ se determină cu formula

$$h = nh_a \qquad \text{(a)}$$

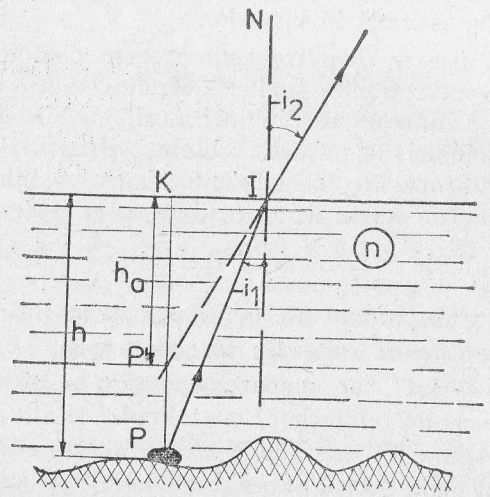



Fig. 147. Pentru răspunsul la întrebarea 24.



unde $h$ este adîncimea reală, iar $h_a$ adîncimea aparentă, adică adîncimea apreciată de observator. Într-adevăr, aplicînd invariantul Snellius-Descartes în punctul $I$, vom scrie

$$n \sin(-i_1) = \sin(-i_2). \qquad \text{(b)}$$

Dar din geometria figurii rezultă

$$\sin(-i_1) = \frac{KI}{PI} \text{ și } \sin(-i_2) = \frac{KI}{P'I}. \qquad \text{(c)}$$

Scoatem pe $n$ din (b) și ținînd seama de (c) și, în plus, considerînd că se privește în vecinătatea normalei, vom avea

$$n = \frac{PI}{P'I} = \frac{h}{h_a}$$

de unde rezultă, imediat, formula (a).

Deplasarea $\Delta h = h - h_a$ se poate calcula direct cu formula

$$\Delta h = (n - 1)\, ha$$

și se obține extrem de ușor. Un exemplu ne va facilita înțelegerea fenomenului. Să presupunem că apreciem adîncimea unei ape ca fiind de 1 m; cum $n = 1{,}333$ (pentru apă), rezultă că $h = 1{,}333$ m. Așadar, adîncimea reală este de 1,333 m; deci, atenție la adîncimea reală a apei!

b) În figura 148 se arată cazul cînd un observator se află complet în apă și privește un obiect de pe mal, de exemplu. Să presupunem că el apreciază că vîrful pomului, reprezentat pe figură, se află la înălțimea $h$ față de nivelul apei. Pentru a afla înălțimea reală $h$ se folosește relația

$$h = \frac{1}{n} h' \qquad \text{(d)}$$

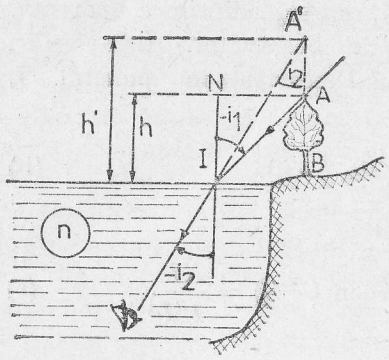



Fig. 148. Pentru răspunsul la întrebarea 24.

care se obține astfel: se aplică invariantul Snellius-Descartes în punctul $I$ și se scoate $n$; vom avea[1]

$$n = \frac{\sin(-i_1)}{\sin(-i_2)}.$$

Exprimînd acum pe $\sin(-i_1)$ și pe $\sin(-i_2)$ în funcție de $h$ și respectiv $h'$ și înlocuind în expresia lui $n$, se obține relația (d). La fel de ușor se obține, $\Delta h = \frac{n-1}{n} h'$. Și acum un exemplu: să presupunem să observatorul vede vîrful $A'$ la $h' = 2$ cm. Folosind (d), se obține, $h = 1{,}5$ m.

Trebuie să reținem că, totuși, formulele (a) și (d) sînt aproximative, deoarece ele au fost obținute în ipoteza că se privește în vecinătatea normalei, în ambele cazuri.

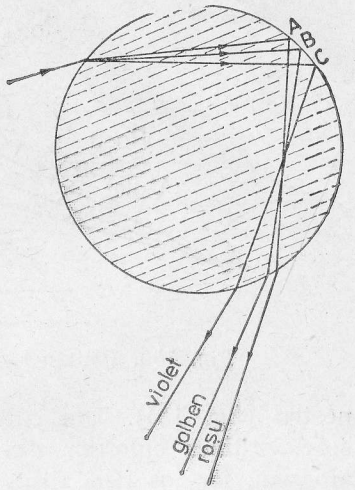
**25.** Pentru a facilita înțelegerea formării curcubeului, vom analiza cu ajutorul figurii 149 ceea ce se întîmplă într-o picătură de apă cînd aceasta se află în calea razelor solare. Raza de lumină intrînd în picătura de apă, suferă, simultan, fenomenul de refracție și de dispersie[2]. Radiațiile componente

[1] Reamintim cititorilor că semnul afectat unghiului de incidență, respectiv de refracție, arată că unghiurile se măsoară de la normală și că sensul pozitiv de măsurare este cel trigonometric.

[2] Fenomenul de variație a indicelui de refracție al unui mediu cu lungimea de undă a radiației electromagnetice. Mai pe înțeles se definește dispersia ca fenomenul de descompunere a luminii în radiațiile componente cînd pătrunde într-un mediu refringent.



Fig. 149. Pentru răspunsul la întrebarea 25.




se reflectă în $A$, $B$, $C$, de exemplu, și la ieșire numai se refractă. În acest fel apar culorile curcubeului, care impresionează ochiul observatorului; observatorul trebuie să stea cu spatele spre Soare și cu fața înspre norul de ploaie. Într-un nor de ploaie sînt o „infinitate" de picături de apă așezate în toate direcțiile, astfel încît mulțimea razelor colorate formează curcubeul în întregime. Picăturile de apă reflectă mai mult radiația albastră din spectrul vizibil și mai puțin radiația roșie. La ochiul observatorului vor ajunge și radiațiile roșii de la picăturile de apă situate mai sus, iar radiațiile albastre și de la picăturile situate mai jos. De aceea, se vede întotdeauna culoarea roșie a curcubeului în partea de sus și culoarea albastră în partea mai de jos.

În realitate curcubeul nu există. Ansamblul picăturilor se comportă ca mai sus și, de aceea, observatorul vede acel fenomen al naturii denumit curcubeu. În figura 150 se arată schematic cum se formează curcubeul.

Uneori se vede un arc dublu (curcubeu secundar) datorită faptului că razele solare ajung în partea inferioară a picăturilor de ploaie suferind de mai multe ori fenomenul de reflexie și apoi de refracție și după aceea ajung la ochiul

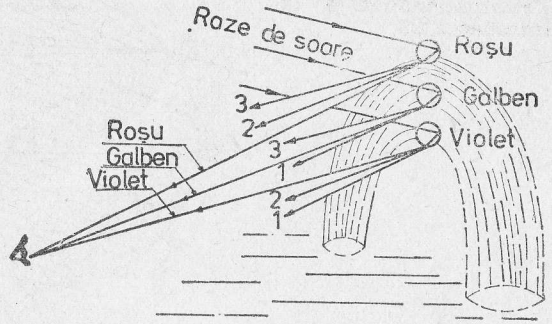



Fig. 150. Pentru răspunsul la întrebarea 25.

nostru (fig. 151). Din cauza acestui fenomen se inversează ordinea culorilor din curcubeul secundar; sus fîşia albastră, iar jos fîşia roşie. În curcubeul secundar culorile sînt mai puţin vii decît în curcubeul propriu-zis (principal). Se pune o întrebare legitimă: de ce curcubeul are forma unui arc de cerc?

Razele de lumină, după ce au suferit fenomenele de refracţie, dispersie şi reflexie, în unele picături de ploaie, ajung la ochii observatorului — mai mult radiaţiile roşii şi mai puţin cele albastre, iar în cazul altor picături ajung mai mult radiaţiile albastre, totul depinzînd de poziţia picăturii, faţă de ochiul observatorului şi faţă de Soare. Picăturile de apă care ocupă aceeaşi poziţie faţă de Soare şi faţă de observator se găsesc pe un arc de cerc. La aceste picături, razele solare ajung sub unghiuri de aceeaşi mărime şi de aici

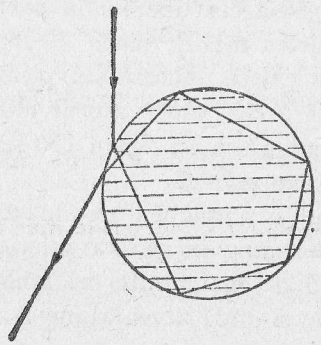
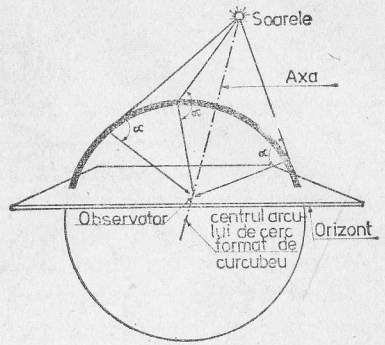


Fig. 151. Pentru răspunsul la întrebarea 25.



Fig. 152. Pentru răspunsul la întrebarea 25.




ajung apoi la ochiul observatorului (fig. 152). Aceste raze formează un con cu vîrful în ochi. Partea inferioară a conului este sub orizont. Centrul arcului de cerc al curcubeului se găseşte pe linia dreaptă care uneşte ochiul observatorului cu Soarele.

26. Aceste fenomene se explică cu ajutorul interferenţe fasciculelor telecentrice.

Fie o sursă de lumină întinsă şi o lamă cu feţe plane şi paralele de grosime $e$ şi indice de refracţie $n$ (fig. 153, a). Fasciculul luminos ce pleacă de la sursa $I$, întîlnind lama suferă simultan fenomene de reflexie şi de refracţie, astfel că la infinit se produce o stare de interferenţă care depinde de diferenţa de drum optic. Aşezînd o lentilă convergentă $L$ în calea acestor raze, în planul focal al acesteia se observă o figură de interferenţă sub forma unor inele, alternativ luminate şi întunecate, concentrice, cu centrul în focarul $F$ al lentilei: *inelele lui Heidinger* (observate prima dată de el, în 1819, la lame subţiri de mică şi studiate în 1884 de către Lummer) (fig. 153, b). Deoarece în lipsa lentilei interferenţa s-ar produce la infinit, se spune că franjele sînt *localizate la infinit*. Ele pot fi văzute cu ochiul liber, ochiul acomodîndu-se pentru poziţia infinită.

O rază $IA$ pornind din punctul $I$ al sursei de lumină suferă în $A$, $B$ şi $C$, atît reflexii cît şi refracţii. Se poate demonstra uşor că raza refractată $CH_1$ este paralelă cu raza reflectată, $AH$. Razele $AH$ şi $CH_1$, provenind din aceeaşi

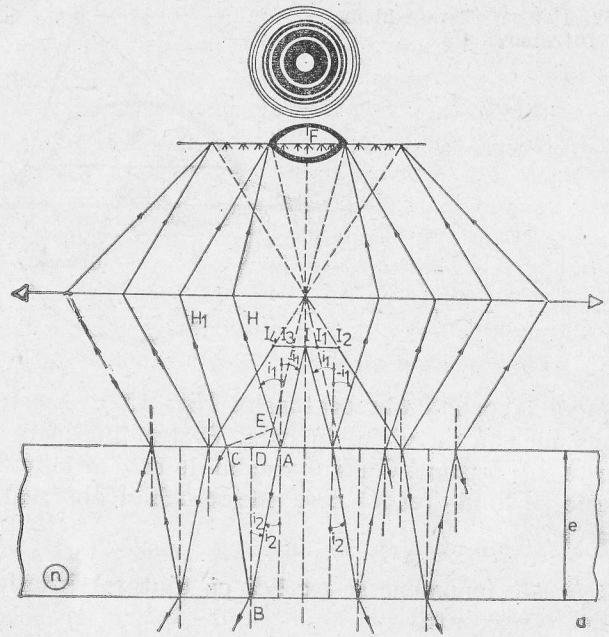



Fig. 153. Pentru răspunsul la întrebarea 26.

rază $IA$, sînt coerente și vor interfera[1]. Razele fiind paralele, figura de interferență se va produce în planul focal al lentilei. Diferența de drum optic între undele ce interferă este dată de relația

$$\Delta = 2e\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} + \frac{\lambda}{2} \qquad \text{(d)}$$

Dacă $e = \text{const.}$, $\Delta$ depinde numai de $i_1$. Razelor cu aceeași incidență $i$ le corespunde în planul focal aceeași franjă și de aceea, franjele obținute se numesc *franje de egală înclinare*. În centru, franja poate fi luminată sau întunecată, după cum diferența de drum optic $\Delta = 2ne + \lambda/2$ este un număr par sau impar de $\lambda/2$.

Fenomenul descris se observă numai dacă grosimea lamei este de ordinul zecimilor de micrometri. Să presupunem că

[1] Corect, undele ce corespund acestor raze. Razele reprezintă direcțiile de propagare a undelor.



o lamă cu fețe plan-paralele are $n = 1{,}5$ și că un maxim corespunde la $k = 2k\lambda/2$). Considerînd, în plus, incidența normală, se obține, cu ajutorul formulei (d), $e = \lambda/2$.

Cele spuse aici sînt valabile în cazul cînd se folosește lumina albă și observarea se face cu ochiul, deoarece ochiul poate distinge culori separate printr-un interval $\Delta\lambda = 0{,}01\ \mu\text{m}$. De aceea, ordinul de interferență maxim admisibil este de 50. Dacă se folosește una din radiațiile mercurului obținută de la o lampă cu vapori de Hg, atunci peliculele pot fi de 1 000 ori mai groase. În acest caz, ochiul poate distinge culori separate de un interval de $\Delta\lambda = 10^5\ \mu\text{m}$.

În lumină policromă, figura de interferență este complicată, formată fiind din toate maximle și minimele care corespund la diversele valori ale lungimii de undă.

Dacă maximul de ordin $k$ corespunzător lui $\lambda + \Delta\lambda$ coincide cu maximul de ordin $(k + 1)$, corespunzător lungimii de undă $\lambda$, atunci figura de interferență nu se poate observa. Între maxime vecine se vor găsi maxime ce corespund lungimilor de undă care nu sînt distincte din intervalul spectral cuprins între $\lambda$ și $\lambda + \Delta\lambda$. $\lambda$ se poate determina utilizînd relația $h = \pm 2k\,\frac{D}{l}\,\frac{\lambda}{2}$, care arată că oricărui punct de pe ecran îi corespunde un maxim de un ordin sau altul al unei lungimi de undă oarecare.

Ținînd seama de cele de mai sus, condiția ce trebuie îndeplinită pentru ca să nu apară figura de interferență este

$$k(\lambda + \Delta\lambda) = (k + 1)\ \lambda$$

de unde

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{k}.$$

Se vede că o dată cu creșterea lui $k$ scade intervalul spectral $\Delta\lambda$ care dă posibilitatea observării figurii de interferență. Dacă lumina nu este suficient de monocromatică, ordinele de interferență ce pot fi observate sînt mici.

Franje de egală înclinare se pot obține foarte ușor așezînd pe o masă o foaie de mică sau celofan și iluminînd-o cu

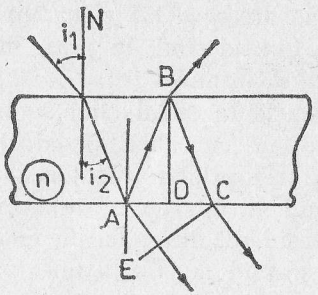



Fig. 154. Pentru răspunsul la întrebarea 26.

o radiație monocromatică. Pe tavanul camerei apar inelele lui Heidinger.

Inelele lui Heindiger se pot observa și prin transmisie (fig. 154). În acest caz, franjele se formează pe un fond luminos. De remarcat că aici, saltul de fază de $\pi$, în $A$ și $B$, nu mai apare și deci în formula care dă diferența de drum optic va lipsi termenul $\lambda/2$. Așa se explică de ce inelelor întunecate prin reflexie, le corespund inele luminate, prin refracție.

Fie o undă plană care întîlnește suprafața unei lame oarecare ce prezintă neuniformități (fig. 155); în punctul $C$ se produce interferența razelor reflectate pe cele două fețe ale lamei. Dacă lama este omogenă din punct de vedere optic (n = const.), diferența de drum optic în punctul $C$ va depinde de grosimea locală a lamei. Lama, avînd grosimea variabilă, ca în figura 155, pe ea se vor observa, în lumină monocromatică, franje alternativ luminate și întunecate, ce unesc punctele în care lama are aceeași grosime, numite *franje de egală grosime*. În lumină albă (de exemplu, lumina difuză a zilei pe o peliculă foarte subțire) se observă franje de egală grosime, irizate și cu forme variate. Dacă lama are

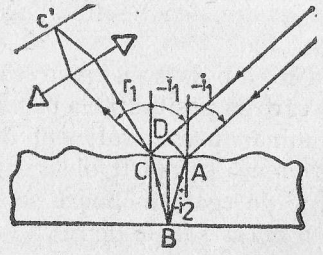
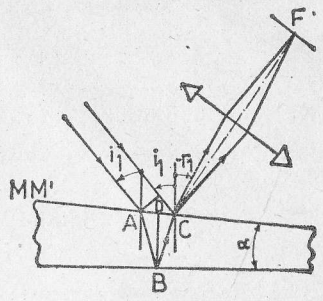



Fig. 155. Pentru răspunsul la întrebarea 26.



Fig. 156. Pentru răspunsul la întrebarea 26.




forma unei pene (fig. 156), atunci franjele iau forma unor benzi paralele cu muchia penei $MM'$. Cu cît unghiul $\alpha$ este mai mic, cu atît franjele sînt mai distanțate; dacă unghiul $\alpha$ este mare, franjele sînt foarte apropiate și nu se mai disting decît foarte greu. Dacă grosimea penei este mare, franjele nu se mai observă decît în lumina monocromatică. Ele pot fi văzute cu ochiul liber dacă se acomodează ochiul pe fața lamei. Franjele sînt localizate pe fața anterioară a lamei și de aceea se zic *franje localizate pe lamă*.

Interferența fasciculelor telecentrice descrisă mai sus — franje de egală înclinare și franje de egală grosime — explică o serie de fenomene observate în fiecare zi, cum sînt: colorațiile petelor de petrol sau de ulei de pe suprafața apei, colorațiile baloanelor de săpun, jocul de colorații pe aripile unor insecte sau păsări, colorațiile pe suprafața sticlelor vechi, irizațiile sidefului ș.a.

Franjele de egală grosime se pot obține ușor astfel: un cadru de sîrmă îl introducem într-o soluție de apă cu săpun și glicerină și apoi îl suspendăm în plan vertical. Datorită forței gravitaționale, pelicula va căpăta forma unei pene și lumina difuză a zilei va face să apară franje de egală grosime, aproximativ drepte, paralele și orizontale.

# CUPRINS


DIN PARTEA AUTORULUI ..... 5
*INTRODUCERE* ..... 7

**PRINCIPII**

PRINCIPIUL RELATIVITĂȚII AL LUI GALILEI.... 16
PRINCIPIILE TEORIEI RELATIVITĂȚII RESTRÎNSE ALE LUI EINSTEIN..... 22
PRINCIPIILE TEORIEI GENERALE A RELATIVITĂȚII ..... 45
PRINCIPIILE TERMODINAMICII..... 53
PRINCIPIUL LUI FERMAT..... 98
PRINCIPIUL LUI HUYGENS..... 102
PRINCIPIUL HUYGENS-FRESNEL..... 108
PRINCIPIUL COMPLEMENTARITĂȚII ..... 130
PRINCIPIUL EXCLUZIUNII ..... 137

**LEGI ALE CĂROR EXPRESII MATEMATICE CUPRIND CONSTANTE UNIVERSALE**

LEGEA FUNDAMENTALĂ A DINAMICII..... 142
LEGEA GRAVITAȚIEI UNIVERSALE..... 166
LEGEA GAZULUI PERFECT ȘI LEGILE GAZELOR REALE..... 206
LEGEA PRESIUNII OSMOTICE..... 225
LEGEA LUI PLANCK PENTRU RADIAȚIE..... 233





**LEGI ALE CĂROR EXPRESII MATEMATICE CUPRIND CONSTANTE CARACTERISTICE MATERIALELOR**

LEGEA LUI COULOMB ..... 250
LEGEA LUI GAUSS ..... 260
LEGEA LUI OHM ..... 268
LEGILE LUI KIRCHHOFF..... 285
LEGEA LUI LAPLACE ..... 296
LEGEA INDUCȚIEI ELECTROMAGNETICE..... 303
LEGEA LUI AMPÈRE ..... 310
LEGEA REFRACȚIEI LUMINII..... 321

**LEGI DE CONSERVARE**

LEGEA CONSERVĂRII ENERGIEI MECANICE TOTALE A UNUI SISTEM..... 342
LEGEA CONSERVĂRII IMPULSULUI TOTAL AL UNUI SISTEM ..... 351
LEGEA CONSERVĂRII MOMENTULUI CINETIC TOTAL AL UNUI SISTEM..... 368
LEGEA CONSERVĂRII SARCINII ELECTRICE..... 379

**ÎNTREBĂRI ȘI RĂSPUNSURI**

ÎNTREBĂRI ..... 388
RĂSPUNSURI ..... 389